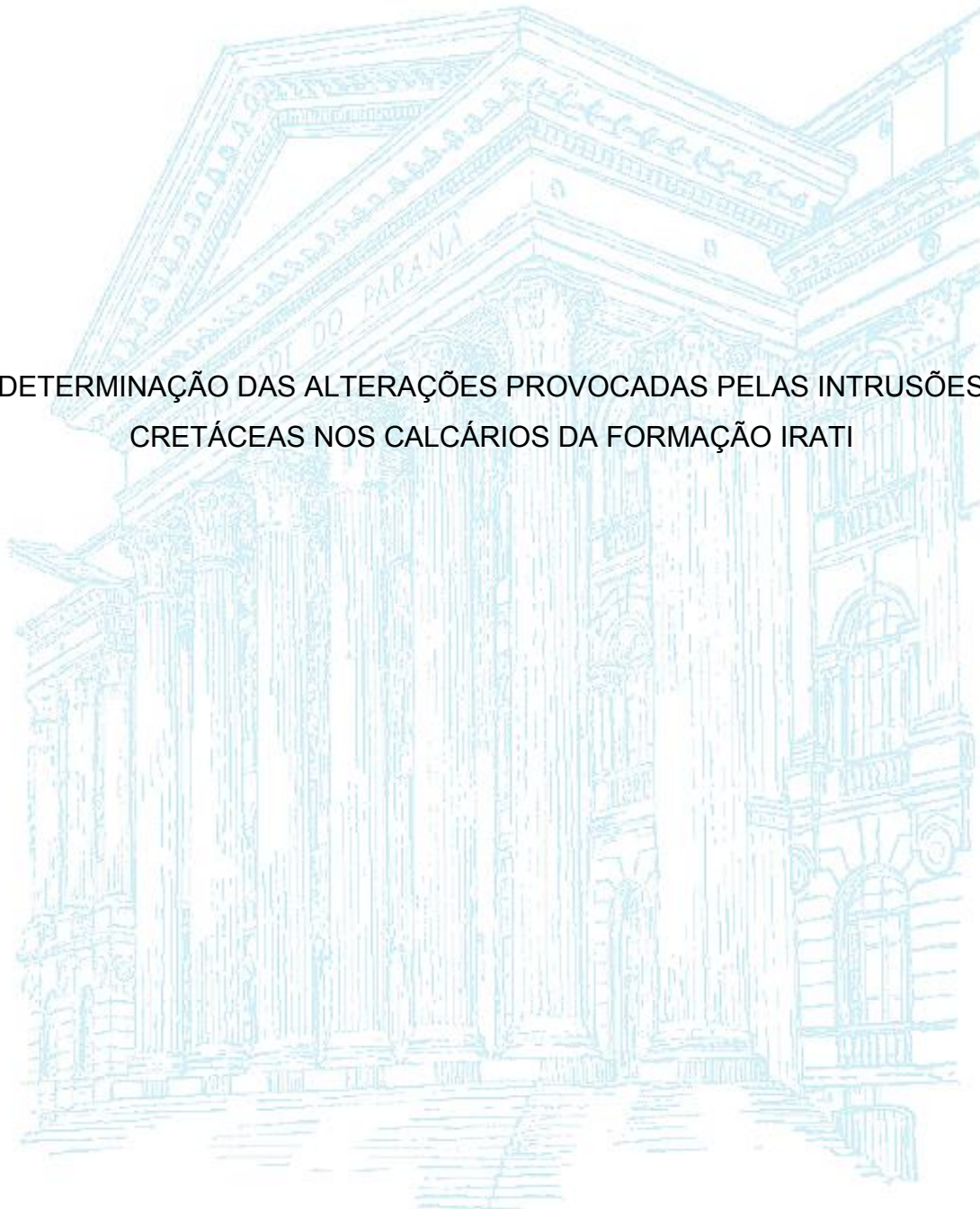


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEXANDRE MILLEN DE CASTRO

DETERMINAÇÃO DAS ALTERAÇÕES PROVOCADAS PELAS INTRUSÕES  
CRETÁCEAS NOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO IRATI



CURITIBA

2019

ALEXANDRE MILLEN DE CASTRO

DETERMINAÇÃO DAS ALTERAÇÕES PROVOCADAS PELAS INTRUSÕES  
CRETÁCEAS NOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO IRATI

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Almério Barros França

CURITIBA

2019

C355d Castro, Alexandre Millen de  
Determinação das alterações provocadas pelas intrusões  
cretáceas nos calcários da formação Irati [recurso eletrônico] /  
Alexandre Millen de Castro – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências  
da Terra, Programa de Pós-graduação em Geologia.

Orientador: Almério Barros França

1. Carbonatos. 2. Magmatismo. 3. Metamorfismo de Contato. I.  
Universidade Federal do Paraná. II. França, Almério Barros. III.  
Título.

CDD: 552.58



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -  
40001016028P5

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ALEXANDRE MILLEN DE CASTRO** intitulada: **DETERMINAÇÃO DAS ALTERAÇÕES PROVOCADAS PELAS INTRUSÕES CRETÁCEAS NOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO IRATI**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Abril de 2019.

  
ALMÉRIO BARROS FRANÇA  
Presidente da Banca Examinadora

  
RICARDO JORGE JAHNERT  
Avaliador Interno

  
LAURY MEDEIROS DE ARAUJO  
Avaliador Externo (PETROBRAS)

Dedico este trabalho aos meus amados pais,  
Mariana e José Luiz, pela inabalável fé na  
educação, amor imensurável e por todo  
amparo.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço à Deus, pois é na fé que possuo nele que consegui seguir em frente e não desistir dos sonhos que almejei. Pela graça da consciência que ele me transmitiu, que pude compreender através do estudo da geologia, as grandezas das suas criações.

Agradeço muito pela orientação do Dr. Almério Barros França, por todo apoio que disponibilizou, tanto nas lições em laboratório, como na campanha de campo. Sem dúvida sua colaboração foi indispensável do início ao fim deste trabalho.

Agradeço ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR), que forneceu estrutura e financiamento para várias despesas deste projeto.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da minha bolsa de pesquisa.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geologia (POSGEOL) pela oportunidade oferecida.

Agradeço as mineradoras que permitiram a entrada nas áreas de estudo para coleta de amostras: Partecal em Rio Claro – SP e Socal em Perolândia – GO.

Agradeço a todos os amigos e pessoas que conheci nesse período do mestrado, todas as discussões geológicas, todos os cafés, todas as reuniões na sala de pós que eram difíceis de organizar, todas as confraternizações no CEGEP da geologia.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao amor da minha vida, Paula Gabriela Leal Hernandez, por todo amor nesses anos de caminhada na geologia e por ter construído junto comigo um amor de rocha.

## RESUMO

A Formação Irati se destaca na Bacia do Paraná pelos folhelhos betuminosos, que são usados na Usina de Xisto da Petrobras em São Mateus do Sul e, como rocha-geradora de petróleo encontrado na Formação Rio Bonito, em vários poços subcomerciais, além da acumulação nos arenitos asfálticos da Formação Pirambóia na Fazenda Betumita em São Paulo. A Formação Irati, em praticamente toda a bacia, encontra-se intrudida por diabásios do Grupo Serra Geral. Essas intrusões ígneas em reservatórios constituídos por rochas sedimentares carbonáticas são um desafio à produção de hidrocarbonetos, pois além de alterarem o gradiente da temperatura local, elas podem gerar convecção de fluido e promover a percolação de líquidos magmáticos na rocha, que podem modificar sua mineralogia, textura, porosidade e permeabilidade naturais. O objetivo do presente trabalho é o de estudar as modificações que ocorreram nos calcários da Formação Irati devidos à essas intrusões. Para isso foram coletadas amostras em pedreiras nas cidades de Perolândia (Goiás) e Rio Claro (São Paulo). As amostragens foram realizadas em perfis verticais adjacentes às soleiras e aplicaram-se os métodos de Petrografia, Microscopia Eletrônica de Varredura, Difração de Raio X, Terra Rara, para determinar as alterações causadas pelas intrusivas. Com os resultados das relações de campo foi possível distinguir a diferença entre as consequências das soleiras na região de Goiás, onde é possível distinguir uma visível borda de metamorfismo térmico nos calcários circundantes a elas, e do que foi encontrado na região de São Paulo, onde o calcário periférico a intrusão apresenta um sutil metamorfismo térmico. Contudo, ainda na região de São Paulo, há cristalização de pirita macroscópica precipitada em planos preferencias: fraturas e acamamento dos calcários; foi possível ainda averiguar uma expressiva mudança na textura do calcário, onde surgem nódulos alongados horizontalmente com uma textura de mármore envoltos em uma auréola de substituição rica em argilominerais (lizardita e saponita) e talco, consequência da distribuição desigual do calor proveniente das intrusões. A petrografia evidencia uma mudança gradual na mineralogia do calcário a medida que se aproxima das intrusões, contudo ela só foi definida de forma efetiva com o uso da Difração de Raio X que demonstra o surgimento de pirita e talco nas áreas mais próximas das soleiras. Na petrografia foi possível observar também que houveram planos preferenciais de percolação de fluídos, que dissolveram o calcário, mas que posteriormente também proporcionou a precipitação do mesmo, que interferiu pouco na permeabilidade da rocha.

As imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura mostraram textura de corrosão no calcário, consequência da interação com os líquidos magmáticos. Tendo esta investigação sendo feita, foi possível criar um modelo teórico de como as alterações se distribuem verticalmente e a área de abrangência das mesmas.

Palavras chaves: Carbonato, Bacia do Paraná, Formação Irati, Magmatismo, Reservatório, Metamorfismo de Contato.



## ABSTRACT

The Irati Formation stands out in the Paraná Basin for the bituminous shales, used in Petrobras Oil Shale Plant in São Mateus do Sul and as source-rock for oil-bearing rock found in the Rio Bonito Formation in several subcommercial wells, in addition to the accumulation in the asphaltic sandstones of the Pirambóia Formation in the Betumita Farm in São Paulo. The Irati Formation, in practically the whole basin, is intruded by diabase of the Serra Geral Group. These igneous intrusions in reservoirs made up of carbonaceous sedimentary rocks are a challenge to the production of hydrocarbons, as well as altering the local temperature gradient, they can generate fluid convection and promote the percolation of magmatic fluids in the rock, which can modify its mineralogy, texture, porosity and permeability. The objective of this work is to study the modifications in carbonates of Irati Formation due to these intrusions. For this, samples were collected in quarries in the cities of Perolândia (Goiás) and Rio Claro (São Paulo). Samplings were collected in vertical profiles adjacent to the sills and the Petrography, Scanning Electron Microscopy, X-Ray Diffraction, Rare Earth Elements methods were applied to determine the changes caused by intrusions. With the results it was possible to distinguish the difference between the consequences of the sills in the region of Goiás, where it is possible to distinguish a visible border of thermal metamorphism in the limestones surrounding them, and of what was found in the region of São Paulo, where the peripheral limestone intrusion presents a subtle thermal metamorphism. However, still in the region of São Paulo, crystallization of macroscopic pyrite precipitated in preference planes: fractures and limestone bedding; it was possible to investigate a significant change in the texture of the limestone, where there are horizontally elongated nodules with a marble texture enveloped in a substitution halo rich in clay minerals (lizardite and saponite) and talc, due to the uneven distribution of the heat from the intrusions. The petrography shows a gradual change in limestone mineralogy as it approaches the intrusions, but it was only effectively defined with the use of X-Ray Diffraction that demonstrates the appearance of pyrite and talc in the areas near the sills. In the petrography, it was possible to see that there were preferential plans of percolation of fluids, which dissolved the limestone, but later also provided the precipitation of the same, interfering little in the permeability of the rock. The Scanning Electron Microscopy images showed corrosion texture in the limestone, as a consequence of the interaction with the magmatic liquids. With this

research being done, it was possible to create a theoretical model of how the changes are distributed vertically and the area of their coverage.

Keywords: Carbonate, Paraná Basin, Irati Formation, Magmatism, Reservoir, Contact Metamorphism.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Mapa de situação da Bacia do Paraná no Brasil, ressaltando a localização das cidades estudadas: Rio Claro (SP), Perolândia (GO).....  | 16 |
| Figura 2 - Mapa de localização dos principais ambientes modernos que precipitam carbonatos e a localização dos principais reservatórios carbonáticos no mundo. Gráfico que ilustra as reservas provadas de petróleo no mundo comparando com a produção nos reservatórios carbonáticos..... | 19 |
| Figura 3 – Fragmento da Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná, focando no período do Permiano. ....  | 21 |
| Figura 4 – Mapa de afloramentos da Formação Irati (verde) inserido na Bacia do Paraná (amarelo). ....  | 23 |
| Figura 5 – Interpretação paleogeográfica do mar restrito de Irati- <i>Whitehill</i> no Permiano, especificamente no Arkintiano. ....   | 24 |
| Figura 6 – Secção esquemática de algumas das principais formas de estruturas formadas por magmatismo, tanto intrusivas como extrusivas. ....   | 26 |
| Figura 7 – Bloco diagrama exemplificando como o metamorfismo de contato afeta rochas carbonáticas. ....  | 27 |
| Figura 8 – Esquema teórico da influência de intrusões na janela do óleo em reservatórios. ....   | 27 |
| Figura 9 – Mapa a) da existência de rochas intrusivas no contato base do sal/carbonatos e mapa b) rochas extrusivas na base Formação Itapema. A escala da legenda foi ajustada pelos autores para ressaltar áreas de alta probabilidade de presença de rochas ígneas.....                  | 29 |
| Figura 10 – Modelo esquemático da dissolução por líquidos hidrotermais em reservatórios carbonáticos do Pré-Sal brasileiro, norte da Bacia de Campos. O processo hidrotermal evolui de A para D. ....  | 30 |
| Figura 1 – Mapa geológico da região de Perolândia (GO) com a localização da área municipal e da Pedreira da Socal. ....  | 35 |
| Figura 2 – Mapa geológico da região de Rio Claro (SP) com a localização da área municipal e da Pedreira da Partecal. ....  | 36 |
| Figura 3 - Foto esquemática de como foi a sistemática em campo para coleta de amostras, foto da frente de lavra em Rio Claro – SP. ....  | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4 – Foto de uma antiga frente de lavra da Sucal. Em (a) o contato entre a intrusiva com a Formação Irati realçado pela linha vermelha, em (b) calcário próximo a intrusão e em (c) calcário sem influência da intrusão.....   | 41 |
| Figura 5 – a) Frente de lavra da pedra Partecal em Rio Claro (SP); b) nódulos diagenéticos que ocorrem nos arredores da intrusão; c) pirita euédrica precipitada entre os planos de acamamento dos carbonatos; d) aspecto dos carbonatos da Formação Irati na região.....  | 42 |
| Figura 6 – Exsudação de petróleo na Formação Irati em Rio Claro (SP).....  | 43 |
| Figura 7 - Mosaico de fotos das amostras coletadas em Goiás: a) diabásio da soleira; b) calcário no contato com a soleira com capa ferruginosa de alteração; c) calcário a 30 cm da soleira mostrando a variação de cor; d) calcário distante suficiente da intrusão para não sofrer influência; e) lâmina petrográfica da soleira; f) lâmina petrográfica em luz polarizada do calcário próximo a intrusão e com minerais de textura mais grossa; g) lâmina petrográfica do calcário a 30 cm da intrusão; h) lâmina petrográfica do calcários da Formação Irati distante de intrusões. ....   | 44 |
| Figura 8 – Mosaico de fotos obtidas em uma mesma lâmina petrográfica, coletada a 1m da soleira, onde a) é a foto de um dos nódulos diagenéticas com dois estágios de crescimento, composto principalmente por talco (Tcl), lizardita (Lz) e calcita (Ca) (luz polarizada); b) mesmo nódulo digenético (luz natural); c) uma fratura de dissolução hidrotermal que cria uma auréola de alteração no entorno com forte argilização do calcário para talco e saponita (Sap) (luz polarizada), pontos pretos na parte superior são poros impregnados com betumem; d) mesma fratura de dissolução hidrotermal (luz natural); e) principal aspecto das falhas de dissolução, que se ramificam e são preenchidas por calcita (luz polarizada); f) aspectos das falhas de dissolução (luz natural). .... | 45 |
| Figura 9 – Nódulo diagenético distante 6m da intrusão, intensa cristalização de calcita espática e substituição para argilominerais e talco, em a) nódulo inteiro na luz natural; b) nódulo inteiro na luz polarizada; c) detalhe do interior do nódulo inteiro na luz natural com a identificação dos minerais e d) detalhe do interior do nódulo inteiro na luz polarizada com a identificação dos minerais.....   | 46 |
| Figura 10 – Lâmina petrográfica no contato entre carbonato e folhelho, algumas fraturas de dissolução e grãos com as bordas impregnadas com betumem, a) luz natural; b) luz polarizada; c) carbonato fortemente argilizado entorno de uma fratura de dissolução (luz polarizada).....  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 11 – Amostra coletada a 30cm da intrusão, possui a maior pungência de fraturas por dissolução, que se conectam a uma fratura principal (luz natural). .....  | 48 |
| Figura 12 – Modelo de como as fraturas de dissolução foram preenchidas por petróleo, que com o tempo transformou-se em betumem, como visto na petrografia. ....   | 49 |
| Figura 13 - Canto superior esquerdo amostra do calcário no contato com a soleira, usado nas amostras, canto superior ??? melhorar. ....   | 50 |
| Figura 14 – Amostra coletada em Perolândia (GO) afastada 6m da soleira. Na esquerda uma lâmina petrográfica a luz polarizada, com uma cavidade totalmente preenchida por calcita (Ca), uma auréola de alteração entorno da cavidade com forte precipitação de pirita (Py) e uma fratura de dissolução conectada a cavidade com forte precipitação de argilominerais magnesianos. Foto a direita de um MEV da mesma amostra com os pontos de EDS. .... | 50 |
| Figura 15 – Foto do MEV de uma amostra coletada em Perolândia (GO) coletada a 3m da intrusão, com gipsita (ponto 001) e argilominerais (002), como visto na foto na parte inferior e dados químicos analisados com EDS. ....  | 52 |
| Figura 16 – Foto do MEV de uma amostra com nódulo diagenético coletada em Rio Claro (SP) a 1m da soleira, mostrando como é a variação química da borda para o centro analisados com EDS. ....   | 53 |
| Figura 17 – Mosaico de imagens de uma amostra 213-18-07 com uma fratura de dissolução e forte argilização, coletada em Rio Claro (SP) a 1m da soleira, a) lâmina petrográfica (luz polarizada); b) zoom no MEV na região fortemente argilizada; c) aspecto das argilas em lâmina.....   | 54 |
| Figura 18 – Foto do MEV da amostra 213-18-07, com os pontos analisados com EDS. ....  | 55 |
| Figura 19 – Foto do MEV da amostra da Figura 9, com os pontos analisados com EDS. ....  | 56 |
| Figura 20 com os pontos analisados com EDS .....  | 57 |
| Figura 21 – Foto do MEV de uma amostra com nódulo diagenético coletada em Perolândia (GO) coletada a mais de 8m da intrusão, com os pontos analisados com EDS .....   | 58 |
| Figura 22 – Difratoograma de um carbonato sem influência ígnea. ....  | 59 |
| Figura 23 – Difratoograma de uma fratura de dissolução a 1m da intrusão, com forte alteração hidrotermal. ....  | 60 |
| Figura 24 – Difratoograma de um carbonato a 30cm da intrusão.....   | 60 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 25 – Difratoograma de um nódulo diagenético a 1m da intrusão .....  | 61 |
| Figura 26 – Modelo de como é a distribuição das alterações no calcário da Formação Irati pela intrusão da soleira do Grupo Serra Geral. .... | 63 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS. ....                       | 51 |
| Tabela 2 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS. ....                       | 52 |
| Tabela 3 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS. ....                       | 54 |
| Tabela 4 – Dados químicos gerados da amostra anterior com EDS. ....                                  | 55 |
| Tabela 5 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS. ....                       | 56 |
| Tabela 6 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS.. ....                      | 57 |
| Tabela 7 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS.. ....                      | 58 |
| Tabela 8 – Amostras que foram analisadas o teor de Terra Rara nos carbonatos da Formação Irati. .... | 62 |

## SUMÁRIO

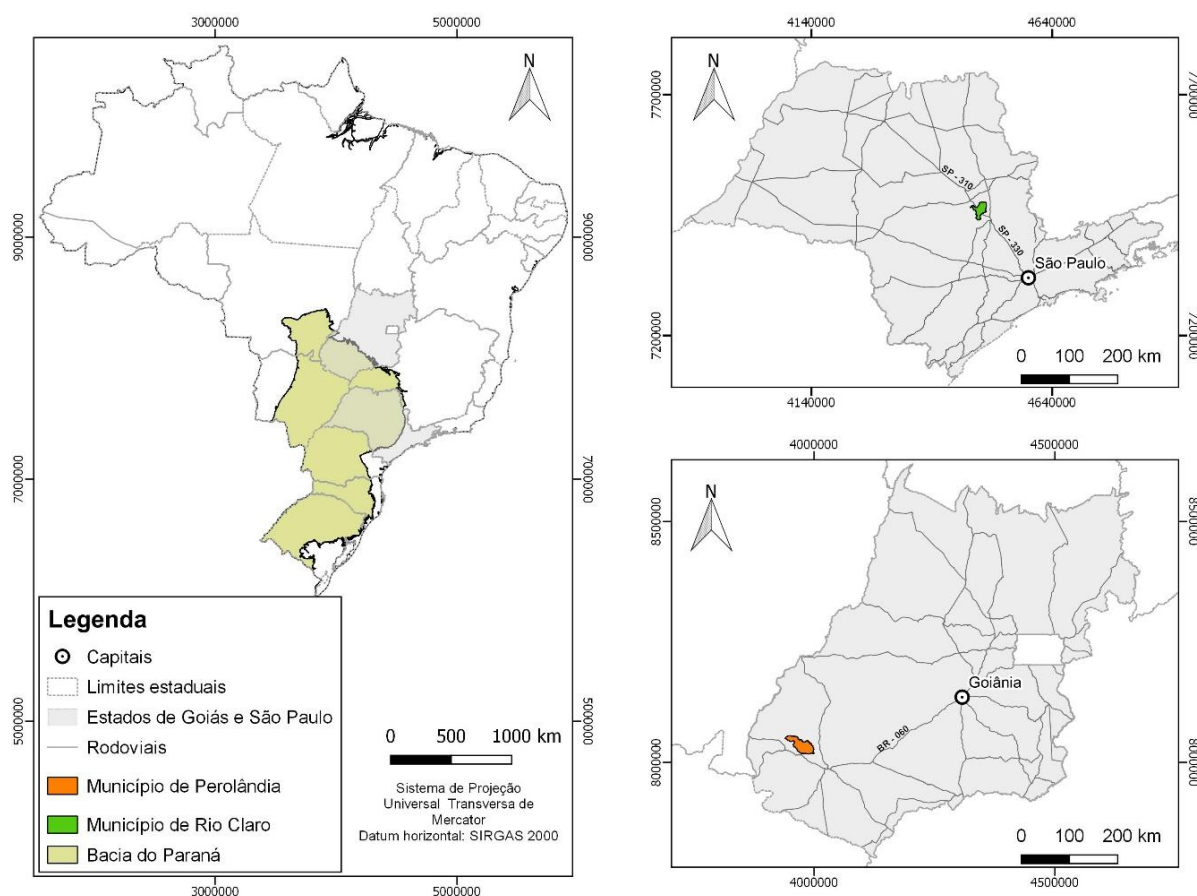
|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introdução .....  | 16 |
| 1.1   | Estrutura da dissertação.....   | 17 |
| 1.2   | Objetivos .....   | 17 |
| 1.2.1 | Objetivos específicos.....  | 17 |
| 1.3   | Relevância do trabalho.....   | 18 |
| 1.4   | Contexto geológico.....   | 19 |
| 1.5   | Geologia local.....   | 22 |
| 2     | Sistemas petrolíferos influenciados por magmatismo.....                       | 25 |
| 3     | Pré-sal brasileiro e a influência magmática .....                             | 28 |
| 4     | Resultados: artigo produzido .....  | 31 |
| 4.1   | Introdução .....  | 33 |
| 4.2   | Área de estudo .....  | 33 |
| 4.3   | Material e métodos.....   | 37 |
| 4.4   | Resultados e Discussões .....   | 40 |
| 4.4.1 | Relações de campo.....  | 40 |
| 4.4.2 | Petrografia .....   | 43 |
| 4.4.3 | Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....                               | 49 |
| 4.4.4 | Difração de Raio X (DRX) .....  | 58 |
| 4.4.5 | Terras raras.....   | 61 |
| 4.5   | Conclusões.....   | 62 |
|       | REFERÊNCIAS .....   | 64 |
|       | APÊNCIDE A – ACEITE DE PUBLICAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RESUMO<br>EM EVENTO. .... | 69 |

# 1 INTRODUÇÃO

Intrusões magmáticas em reservatórios são um desafio à produção de hidrocarbonetos, seja qual for a natureza do reservatório. Além de alterar o gradiente da temperatura local e provocar metamorfismo de contato, podem gerar convecção de fluidos e fornecer líquidos magmáticos que percolam a rocha reservatório, influenciando na diagênese com dissolução, aumento e/ou redução da porosidade.

Nesse trabalho, foram estudadas as intrusões ígneas entre as camadas da Formação Irati, com a identificação e caracterização das alterações presentes nos calcários dessa unidade geológica. Essas intrusões variam em tipo e grau conforme a distância da intrusão aumenta. Os trabalhos de campo concentraram-se em pedreiras de extração de calcários, nas cidades de Rio Claro (SP) e Perolândia (GO) (Figura 1), com objetivo de espacializar os tipos de alterações que ocorrem na mesma Formação Irati.

Figura 1 – Mapa de situação da Bacia do Paraná no Brasil, ressaltando a localização das cidades estudadas: Rio Claro (SP), Perolândia (GO).





## 1.1 Estrutura da dissertação

Essa dissertação é composta por quatro itens principais: introdução, a revisão bibliográfica do tema, os resultados em formato de artigo e as considerações finais de todo o trabalho.

Na introdução é apresentado os objetivos, a relevância da pesquisa e o contexto geológico da área estudada. Nos capítulos 2 e 3 é apresentada a revisão bibliográfica e o conhecimento que se tem a respeito dos principais sistemas petrolíferos.

No final são apresentadas as considerações do trabalho, os métodos e material utilizados são apresentados nos artigos e as referências utilizadas ao longo da dissertação são apresentadas ao final, juntamente com o apêndice A de aceite de publicação de resumo e apresentação de trabalho no 49º Congresso Brasileiro de Geologia.

O artigo, “**DETERMINAÇÃO DAS ALTERAÇÕES PROVOCADAS PELAS INTRUSÕES ÍGNEAS NOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO IRATI**”, aborda a interpretação de dados petrográficos e geoquímicos, de amostras de calcários e margas que têm influência de intrusões ígneas. Estas amostras foram coletadas na Formação Irati da Bacia do Paraná, nas cidades de Perolândia (GO) e Rio Claro (SP), para então construir um modelo sobre a distribuição das alterações hidrotermais nos carbonatos.

## 1.2 Objetivos

O objetivo é identificar e caracterizar as alterações presentes nos calcários da Formação Irati decorrentes das intrusões ígneas e elaborar um modelo que explique os mecanismos que influenciaram estas alterações no calcário.

### 1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são identificar:

- Área de influência da alteração;
- Os planos preferenciais de propagação do fluxo hidrotermal;
- Quais foram as mudanças: texturais (micro e macro), mineralógicas e químicas provocadas nos calcários.

### 1.3 Relevância do trabalho

Nas últimas décadas o mercado de petróleo e gás tem dado atenção para modelos não-convencionais de acumulação de hidrocarbonetos, como exemplo desta tendência são os grandes investimentos em gás de folhelho, principalmente na produção norte-americana.

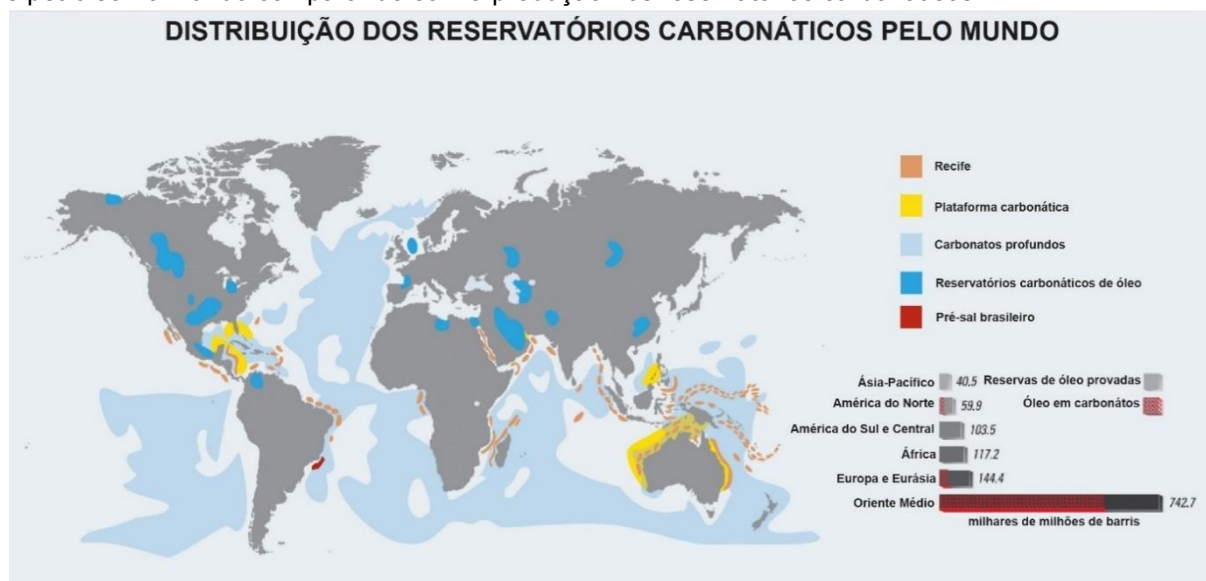
Muitos autores classificam sistemas petrolíferos influenciados por magmatismo como não-convencionais ou atípicos (Magoon & Dow, 1994), decorrente do fato da maior parte das ocorrências não serem comerciais. O exemplo brasileiro foi o estudo elaborado por Rodrigues (1995), que mostrou que a zona de influência térmica pode atingir uma distância de 170% proporcional a espessura de uma soleira com 9 m de espessura na Bacia do Parnaíba, onde a geração de hidrocarboneto se deu entre as distâncias de 80% e 140% com relação a espessura da intrusiva. Exemplificando ainda as experiências no Brasil e no âmbito de geração de hidrocarbonetos, o trabalho de Cunha e colaboradores (1988) mostrou a associação do diabásio Penatecaua, na Bacia do Solimões, como responsável pelos grandes campos de óleo e gás na Amazônia.

Focando no âmbito de reservatórios influenciados por magmatismo, intuitivamente pode-se prever que a tendência é que as intrusões piorem a qualidade para acumulação de hidrocarbonetos, como Aarnes e colaboradores (2011) mostraram que houve localmente uma redução da porosidade em arenitos alterados pelo metamorfismo de contato decorrente de intrusões na Bacia do Karoo, África do Sul.

Entretanto, já em reservatórios carbonáticos influenciados por magmatismo, Kang Xu e colaboradores (2015) mostraram como as intrusões podem alterar de forma distinta as encaixantes nos reservatórios na região de Bachu, na Bacia de Tarim, região noroeste da China. A porosidade dos carbonatos aumenta na proximidade da intrusão, de modo que os reservatórios estão situados perto de rochas intrusivas, onde a porosidade aumentou de 2,8% para 6,8%, podendo alcançar até 9,6% como consequência do envolvimento de fluidos magmáticos que formaram feições de corrosão e controlou a formação de poros secundários.

Grande parte das reservas mundiais de óleo e gás estão em reservatórios carbonáticos, como ilustrado na Figura 2. Reservatórios petrolíferos constituídos por rochas carbonáticas, principalmente por calcários dolomíticos sempre exerceram um papel relevante na indústria do petróleo por conterem elevados volumes de óleo e gás natural.

Figura 2 - Mapa de localização dos principais ambientes modernos que precipitam carbonatos e a localização dos principais reservatórios carbonáticos no mundo. Gráfico que ilustra as reservas provadas de petróleo no mundo comparando com a produção nos reservatórios carbonáticos.



Fonte: Modificado de Schlumberger (2007).

As rochas carbonáticas têm importância crescente considerando a maturidade exploratória dos reservatórios mais rasos e a necessidade da exploração de reservatórios mais profundos, sendo o Pré-Sal brasileiro um exemplo mundial clássico. Enquanto as rochas siliciclásticas geralmente perdem suas características de reservatório (porosidade e permeabilidade) em altas profundidades, os reservatórios carbonáticos conseguem, em certas condições, manter-se efetivos.

As camadas de carbonatos do Pré-Sal, produtoras na Bacia de Santos, possuem intrusões e derrames intercalados. A presença de rocha ígnea tem afetado de maneiras distintas os reservatórios carbonáticos e pouco se conhece sobre estes efeitos pelas dificuldades e custos de amostragem em poços profundos. Deste modo, os resultados deste estudo em afloramentos da Formação Irati podem ser importantes e servir como análogos à exploração do Pré-Sal, onde ocorra intrusões.

#### 1.4 Contexto geológico

A Formação Irati, de idade permiana, é uma das unidades litológicas que afloram nas bordas leste e norte da Bacia do Paraná e ocorre em profundidades de até 3.000 metros, constatada em poços. A Bacia do Paraná possui uma área de aproximadamente 1.100.000 km<sup>2</sup>, que somada à Bacia do Chaco-Parana no Paraguai, Argentina e Uruguai,

atinge mais de 1.400.000 km<sup>2</sup>. Geometricamente possui um formato ovalado, com o eixo principal para N-S, com dimensões de 1.750 km de comprimento, 900 km de largura e uma espessura máxima de 7 km. A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica, com uma história deposicional que se inicia no Ordoviciano Superior e encerra no Cretáceo Superior, com os últimos derrames magmáticos do Grupo Serra Geral (Milani *et al.* 2007a). Dois terços da Bacia do Paraná são cobertos por estas rochas ígneas, decorrentes dos ciclos brasileiros que culminaram na abertura do Atlântico.

Milani (1997), em sua tese, particiona a Bacia do Paraná em seis supersequências, termo cunhado por Vail e colaboradores (1977), utilizando critérios cronológicos e individualizados por superfícies de discordância regional, as supersequências foram denominadas:

- Rio Ivaí é a primeira supersequência a se formar na Bacia do Paraná, representando o primeiro ciclo sedimentar sob o embasamento cratônico constituído após as Orogenias Brasileiras e sendo representante do primeiro evento de glaciação na bacia. O topo da supersequência é limitada por uma discordância presente em toda extensão da bacia, que chegou a desgastar todo o pacote deposicional ordoviciano-siluriano em alguns locais;
- Paraná é depositada sobre a supersequência anterior e, em alguns locais, diretamente sobre o embasamento, consequência da discordância regional que as separam. Registro do ciclo transgressivo à regressivo no Devoniano, decorrente de variações do nível do paleoceanos Panthalassa.
- Gondwana I é a supersequência com maior volume de rochas sedimentares da bacia, alcançando até 2.500 m. Formada no Carbonífero-Eotriássico e por depósitos glaciais, sucedidos por eventos transgressivos seguidos por um regressivo, culminando na continentalização da bacia. A Formação Irati é inserida na metade da supersequência Gondwana I (Figura 3), antes da sequência sedimentar dos primeiros ambientes continentais;

Figura 3 – Fragmento da Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná, focando no período do Permiano.

| BACIA DO PARANÁ |               |          |              |                |                          |                            |               |                   |                      |                      | EDISON JOSÉ MILANI et al. |           |            |
|-----------------|---------------|----------|--------------|----------------|--------------------------|----------------------------|---------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|-----------|------------|
| Ma              | GEOCRONOLOGIA |          |              |                | NATUREZA DA SEDIMENTAÇÃO | AMBIENTE DEPOSICIONAL      | DISCORDÂNCIAS | LITOESTRATIGRAFIA |                      |                      | ESPESSURA MÁXIMA (m)      | SEQUÊNCIA |            |
|                 | ERA           | PERÍODO  | ÉPOCA        | IDADE          |                          |                            |               | GRUPO             | FORMAÇÃO             | MEMBRO               |                           |           |            |
| 250             | PALEOZOICO    | PERMIANO | TRIÁSSICO    |                | CONTINENT. MARINHA       | EÓLICO FLUVIAL LAGOS RASOS | EOTRIÁSSICA   | PASSA DOIS        | PIRAÍ-BOIA           | SANGA DO CABRAL      | MORRO PELADO SERRA NHA    | 650       | GONDWANA I |
|                 |               |          | LOPINGIANO   | CHONGSHINGIANO |                          |                            |               |                   | RIO DO RASTO         |                      |                           |           |            |
|                 |               |          | GUADALUPIANO | WUCHIAPINGIANO |                          |                            |               |                   | TERESINA             |                      |                           |           |            |
|                 |               |          |              | CAPITANIANO    |                          |                            |               |                   | SERRA ALTA           |                      |                           |           |            |
|                 |               |          |              | WORDIANO       |                          |                            |               |                   | IRATI                | ASSISTÊNCIA TAQUARAL | 100                       |           |            |
|                 |               |          |              | ROADIANO       |                          |                            |               |                   | GUATÁ                | PALESMO              | 70                        |           |            |
|                 |               |          |              | KUNGURIANO     |                          |                            |               |                   | RIO BONITO           | SIDERÓPOLIS          | 300                       |           |            |
|                 |               |          |              | ARTINSKIANO    |                          |                            |               |                   | TACIBA               | PARAGUACU            | 350                       |           |            |
|                 |               |          |              | CISURALIANO    |                          |                            |               |                   | SAKMARIANO           | TRINFINO             |                           |           |            |
|                 |               |          |              |                |                          |                            |               |                   | ASSELIANO            | RIO DO SUL           | 1500                      |           |            |
| 300             |               |          | CARBONÍFERO  |                |                          | PERI-GLACIAL               |               | ITARARÉ           | CAMPO MOURÃO L. AZUL | C. TENENTE           |                           |           |            |

Fonte: modificado de Milani *et al.* (2007a).

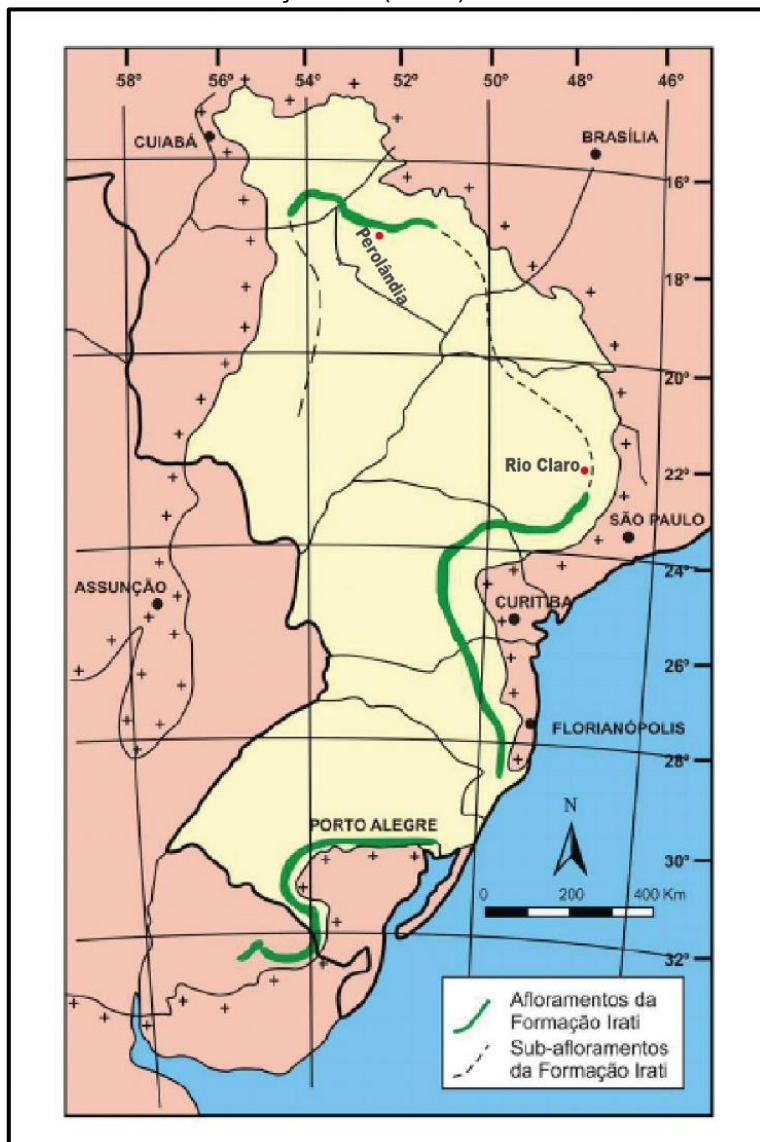
- Gondwana II é separada da supersequência anterior por meio de uma nítida discordância basal, que é interpretada como uma rápida transgressão lacustre, indicando um afundamento rápido do substrato da bacia, onde pelitos lacustres se depositavam na porção com maior subsidência, já nas porções mais proximais os pelitos intercalam com arenitos fluviais, resposta a oscilação do nível de base do paleolago. A supersequência Gondwana II é a evolução da Bacia do Paraná ao longo do Meso a Neotriássico, tendo como principal característica o conteúdo da sua paleoherpetofauna da Formação Santa Maria no Rio Grande do Sul;
- Gondwana III representa na estratigrafia da bacia o intervalo do Neojurássico ao Eocretáceo. A Supersequência Gondwana III está distribuída por toda a Bacia do Paraná e a litologia é majoritariamente composta por arenitos eólicos e derrames magmáticos. Estas duas litologias marcam dois eventos singulares na história da bacia, os arenitos são reflexos do grande paleodeserto Botucatu, que se formou após a consolidação do paleocontinente Gondwana. Já os derrames magmáticos são consequência do evento que fragmentou o Gondwana e culminou na abertura do Oceano Atlântico. Esses eventos magmáticos criaram expressões em todos os níveis estratigráficos da bacia, com o alojamento de corpos intrusivos na forma de diques e soleiras e imensos pacotes de derrames de magma, que somado ao registro do magmatismo presente na bacia correlata na África, constituem a Província Magmática Paraná-Etendeka;
- Bauru é o último evento deposicional da Bacia do Paraná, depositada no Cretáceo Superior em ambiente árido. Contudo Fernandes e Coimbra (1994) elevaram a Supersequência Bauru a nível de bacia, interpretando que ela sucede

a Bacia do Paraná e desenvolve-se após a ruptura do paleocontinente Gondwana, assim estabelecendo-se como Bacia Bauru.

## 1.5 Geologia local

As primeiras descrições sistemáticas da Formação Irati foram feitas por White em 1908, com foco nos folhelhos negros com presença de fragmentos de ossos de *Mesosaurus brasiliensis*, próximo a cidade de Irati no Paraná. A hierarquia estratigráfica da Formação Irati foi proposta por Barbosa & Gomes (1958), segmentando a formação em dois membros: Membro Taquaral e Membro Assistência. Mas foi com o trabalho de Hachiro (1996) que foi feita uma caracterização petrográfica e faciológica detalhada da formação considerada neste trabalho. A Formação Irati estende-se por quase toda a Bacia do Paraná, mas aflora nas porções mais periféricas, como ilustrado na Figura 4. A compreensão da continuidade da Formação Irati para o interior da Bacia do Paraná se concebeu graças às campanhas de sondagem realizadas pela Petrobras nas décadas de 1960 e 1970. A Formação Irati possui uma espessura média de 40 m (Mendes *et al.* 1966), chegando a atingir até 70 m no Uruguai, com o nome de Formação Mangrullo (Caorsi & Goñi, 1958).

Figura 4 – Mapa de afloramentos da Formação Irati (verde) inserido na Bacia do Paraná (amarelo).

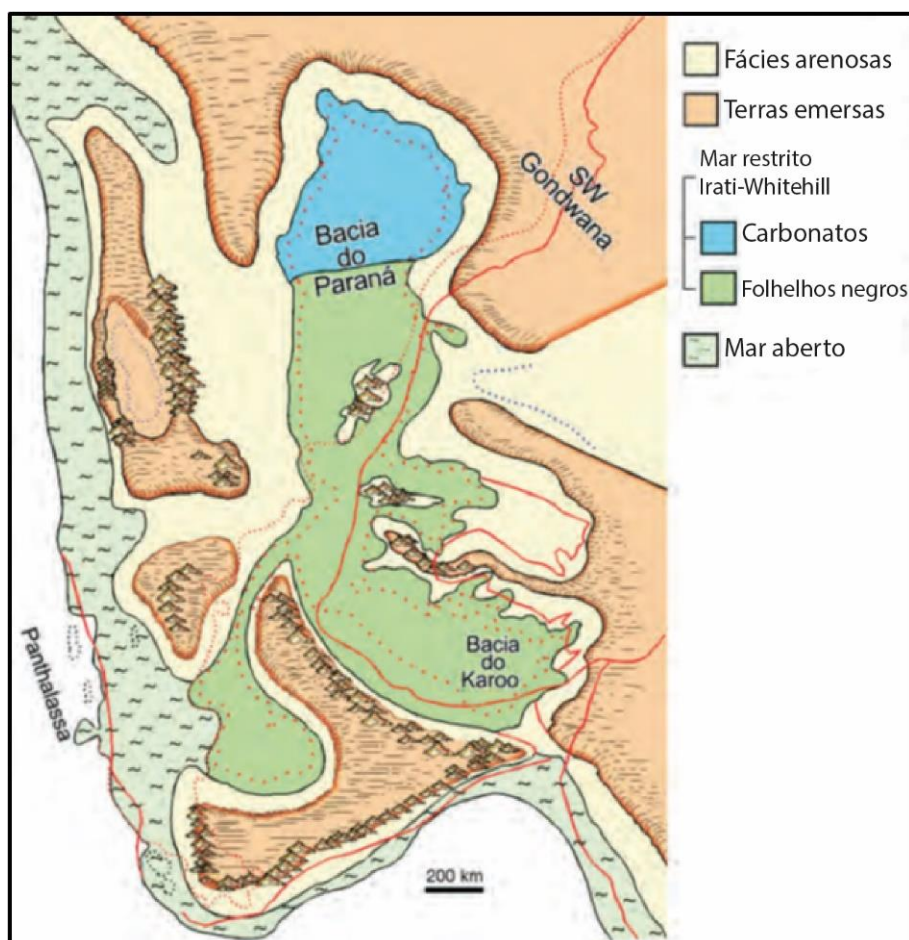


Fonte: Modificado de Chaves *et al.* (1988).

A Formação Irati é constituída de folhelhos, margas, carbonatos e sulfatos, e representa um aumento progressivo da salinidade da base para o topo, onde a sedimentação se dá em condições de um ambiente de mar restrito, com uma precária circulação de água entre o golfo Irati e o paleoceanos Panthalassa (Figura 5) (Milani *et al.* 2007b).



Figura 5 – Interpretação paleogeográfica do mar restrito de Irati-Whitehill no Permiano, especificamente no Arktintiano.



Fonte: Milani *et al.* (2007b).

A Formação Irati está inserida na base do Grupo Passa Dois, sobreposta a Formação Palermo e abaixo da Formação Serra Alta (Figura 3). Datada com uma idade artinskiana ( $278,4 \pm 2,2$  Ma) (Santos *et al.* 2006) pelo método da datação Shrimp U-Pb em zircões provenientes de camadas bentoníticas originadas da queda de cinza vulcânica. A Formação Irati é subdividida em dois membros:

- Membro Taquaral: compõe a base da Formação Irati e marca o início da supersequência Gondwana I. O Membro Taquaral possui folhelhos silticos, cinza escuros. Localmente, no estado de São Paulo ocorrem finas camadas de arenito conglomerático com grânulos de sílex, dentes e fragmentos de ossos de peixes (Hachiro, 1996).
- Membro Assistência: presente no topo da Formação Irati, o Membro Assistência é de difícil separação devido à forte homogeneidade das camadas, tendo um contato concordante na base com o Membro Taquaral e no topo com a Formação Serra Alta. O Membro Assistência possui folhelhos cinza escuros e folhelhos



pretos betuminosos, associados a calcários e ocasionais evaporitos (Hachiro, 1996). Os estudos do presente trabalho se concentram no Membro Assistência.

A Formação Irati é intrudida por diabásios do Grupo Serra Geral, em forma de diques e soleiras com espessuras de até 200 m (Corrêa, 2007). As espessuras dessas intrusões influenciam nos efeitos térmicos na rocha intrudida, sendo os corpos ígneos de maior espessura os que possuem maior magnitude na alteração em rochas da Formação Irati.

Araújo (2000) demonstrou que a matéria orgânica nos folhelhos sofre alteração térmica até uma distância com a mesma espessura da intrusão, ou seja, uma intrusão de 2 metros afeta a matéria orgânica em quatro metros de folhelhos, dois metros acima, e dois metros abaixo da soleira. Os efeitos das intrusivas nos carbonatos, entretanto, é pouco conhecido.

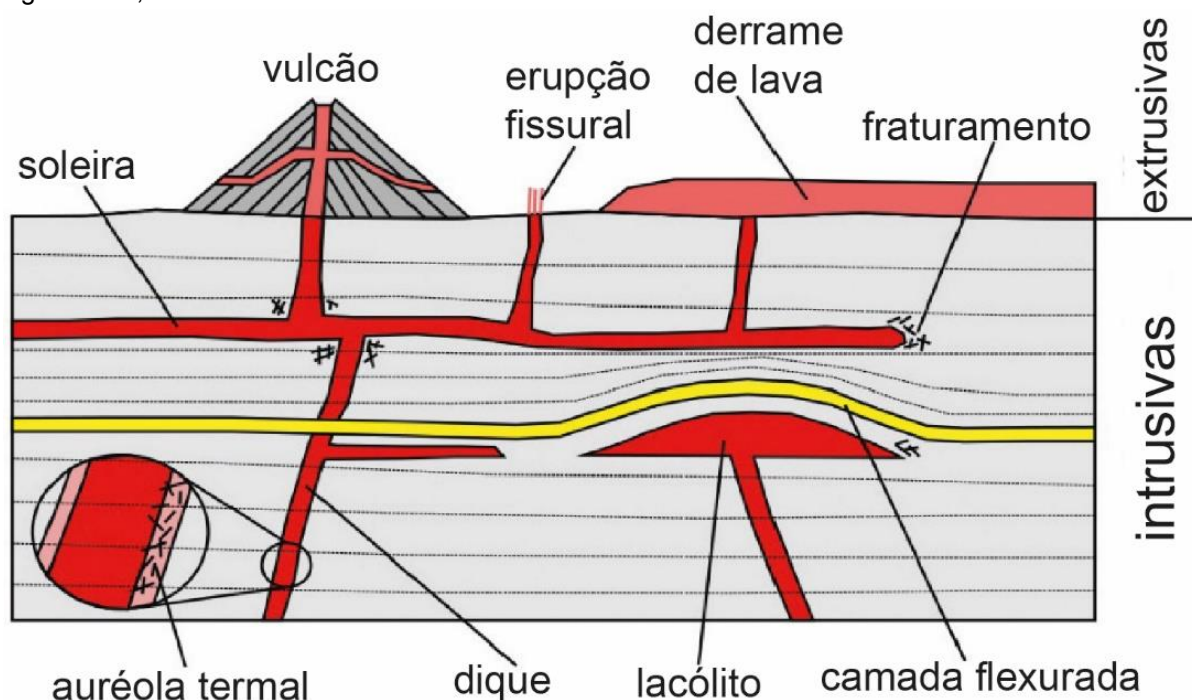
Leinz (1937) e Amaral (1967) observaram forte mudança textural dos calcários, que evoluíram de uma textura muito fina, natural dos calcários da Formação Irati, para um aumento da granulometria a medida que se aproxima do contato com o diabásio, criando um aspecto de mármore. Eles também observaram mudança da coloração dos calcários de preto para branco, acompanhado da perda de betume e cristalização de minerais neoformados, como: grafita, diopsídio, apofilita e hidromagnesita.

## **2 SISTEMAS PETROLÍFEROS INFLUENCIADOS POR MAGMATISMO**

Diversas bacias sedimentares tiveram ao longo de sua história eventos magmáticos de natureza e intensidades diversos. Tornando impossível desvencilhar todas as possíveis acumulações de hidrocarbonetos de qualquer influência ígnea.

Os eventos magmáticos podem se apresentar de diversas formas em subsuperfície ou quando são expelidos, como ilustrado na seção esquemática da Figura 6. Corpos ígneos intrusivos são os principais responsáveis por influenciarem os sistemas petrolíferos, podendo esta influência ocorrer em qualquer um dos elementos e processos do sistema petrolífero: maturação da matéria orgânica, migração de fluidos, modificação do reservatório e no trapeamento ou armadilha.

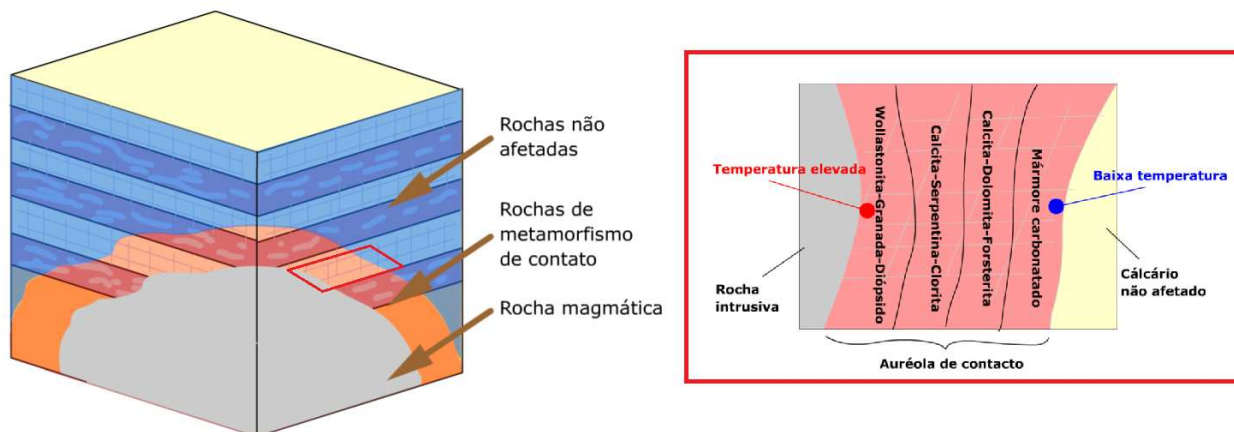
Figura 6 – Secção esquemática de algumas das principais formas de estruturas formadas por magmatismo, tanto intrusivas como extrusivas.



Fonte: modificado de Senger *et al.*, 2017.

Uma das consequências diretas de intrusão é a formação da auréola metamórfica de contato causada pelo aquecimento localizado da rocha hospedeira, modificando sua mineralogia. Quanto mais perto da intrusão, de mais alta temperatura de cristalização serão os minerais neoformados e a medida que se afasta, serão formados minerais com temperaturas mais baixas, até não ocorrer mais mudança da mineralogia, somente da textura dos minerais, exemplificando como os calcários tornam-se mármore. A Figura 7 ilustra de maneira teórica essa evolução da auréola metamórfica de contato. Outra consequência é o fraturamento hidráulico natural, decorrente das pressões de fluidos das intrusões e a diferença de temperatura entre a intrusão e a rocha encaixante.

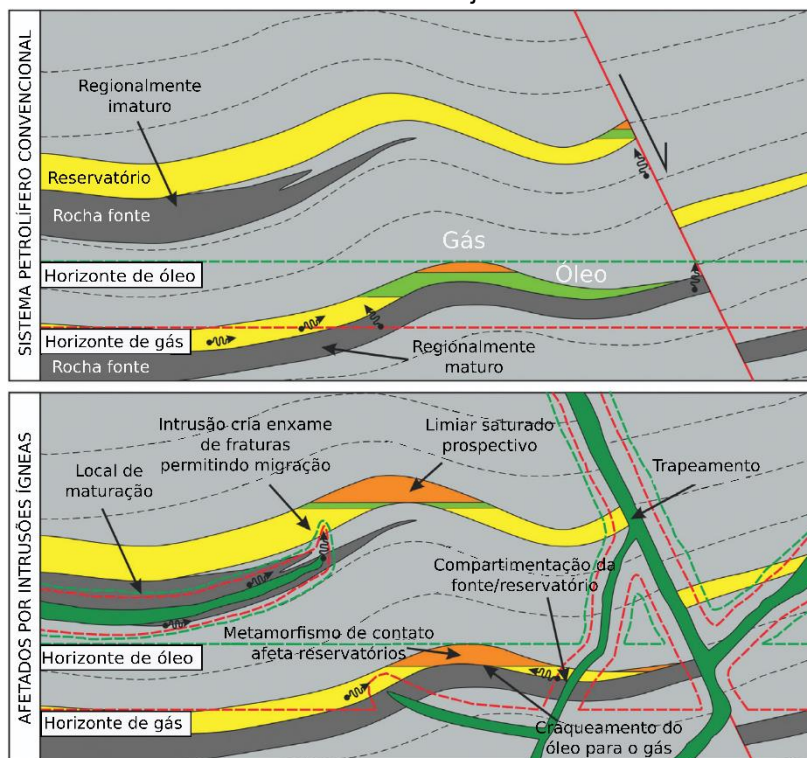
Figura 7 – Bloco diagrama exemplificando como o metamorfismo de contato afeta rochas carbonáticas.



Fonte: modificado de Kullerud 2007.

Os diferentes efeitos das intrusões no sistema petrolífero estão resumidos na Figura 8. Em alguns casos as intrusões ígneas influenciam o sistema petrolífero convencional. Em outros casos, como quando intrusões ígneas formam reservatórios ou vedações, as intrusões podem representar diretamente um elemento do sistema petrolífero.

Figura 8 – Esquema teórico da influência de intrusões na janela do óleo em reservatórios.



Fonte: modificado de Senger *et al.*, 2017.

Senger e colaboradores (2017) elaboraram um trabalho de compilação mostrando que há vários exemplos de campos de hidrocarbonetos associados a rochas ígneas em todo o mundo (Schutter, 2003). Muitos deles representam acumulações não comerciais, mas há exceções importantes. Exemplo atual são os hidrocarbonetos produzidos comercialmente a partir de intrusões ígneas fraturadas na bacia argentina de Neuquén. Senger e colaboradores (2017) exemplificam que esses reservatórios atípicos, como o campo de *Los Cavaos*, geralmente abrigam até 25 milhões de barris de óleo recuperável por campo e são caracterizados por rápidas taxas de produção inicial de até 10.000 barris/dia (Witte *et al.*, 2012). Além de formar reservatórios, intrusões ígneas podem ser colocadas em uma ampla faixa de profundidades de soterramento, afetando todos os elementos básicos do sistema petrolífero em um escopo mais amplo do que simplesmente alimentar fluxos de lava extrusiva ou outros depósitos vulcânicos efusivos que se tornam parte do preenchimento da bacia. Algumas bacias vulcânicas, como o sistema *Rockall Trough-Vøring-Møre* ao longo da margem continental do Reino Unido-Noruega, estão atualmente sendo direcionadas para seu potencial de hidrocarbonetos. Em outras bacias vulcânicas, como a bacia de Faroe-Shetland, descobertas significativas já foram feitas, por exemplo, como a descoberta dos campos de Rosebank, Laggan e Tormore (Schofield *et al.*, 2017). Nestes ambientes, as intrusões ígneas influenciam diretamente todos ou vários aspectos do sistema petrolífero, incluindo carga, selo, armadilha e reservatório (Jerram, 2015).

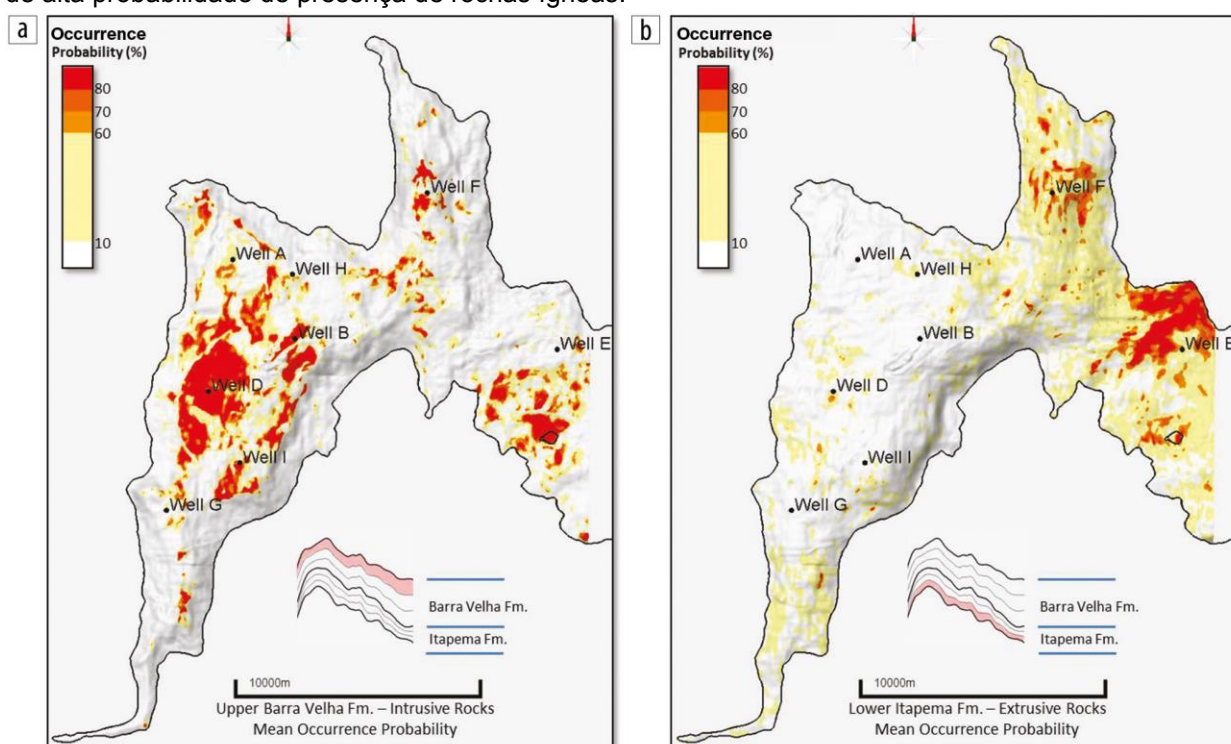
### 3 PRÉ-SAL BRASILEIRO E A INFLUÊNCIA MAGMÁTICA

Atualmente as reservas de hidrocarbonetos no Pré-Sal brasileiro apresentam-se como um dos principais alvos exploratórios recentes dentro do mercado petrolífero mundial, havendo poços de alta produtividade que já alcançaram produções médias diárias na ordem de 33.000 de barris de óleo equivalente (boe/d) (ANP, 2019). Desta forma, alavancando o Brasil para um novo patamar de produção de hidrocarbonetos no mundo.

Uma das particularidades existente nos *plays* do Pré-Sal brasileiro é a presença de rochas ígneas, tanto intrusivas como extrusivas, representando uma componente do sistema petrolífero ou mesmo causando feições diagenéticas de origem hidrotermal, até mesmo sendo uma das possíveis explicações para os grandes volumes de CO<sub>2</sub> existente.

Um trabalho recente publicado por Penna e colaboradores (2019), utiliza sísmica para delimitar as camadas de rochas ígneas existente no Pré-Sal no norte da Bacia de Santos, especificamente a Formação Barra Velha e Formação Itapema. Como os poços no Pré-Sal são muito profundos acabam sendo muito onerosos, desta forma Penna e colaboradores (2019) utilizaram de dados geofísicos para modelagem geológica dessas formações, criando assim um modelo probabilístico para inferir o volume de distribuição destas rochas ígneas intrusivas e extrusivas, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Mapa a) da existência de rochas intrusivas no contato base do sal/carbonatos e mapa b) rochas extrusivas na base Formação Itapema. A escala da legenda foi ajustada pelos autores para ressaltar áreas de alta probabilidade de presença de rochas ígneas.



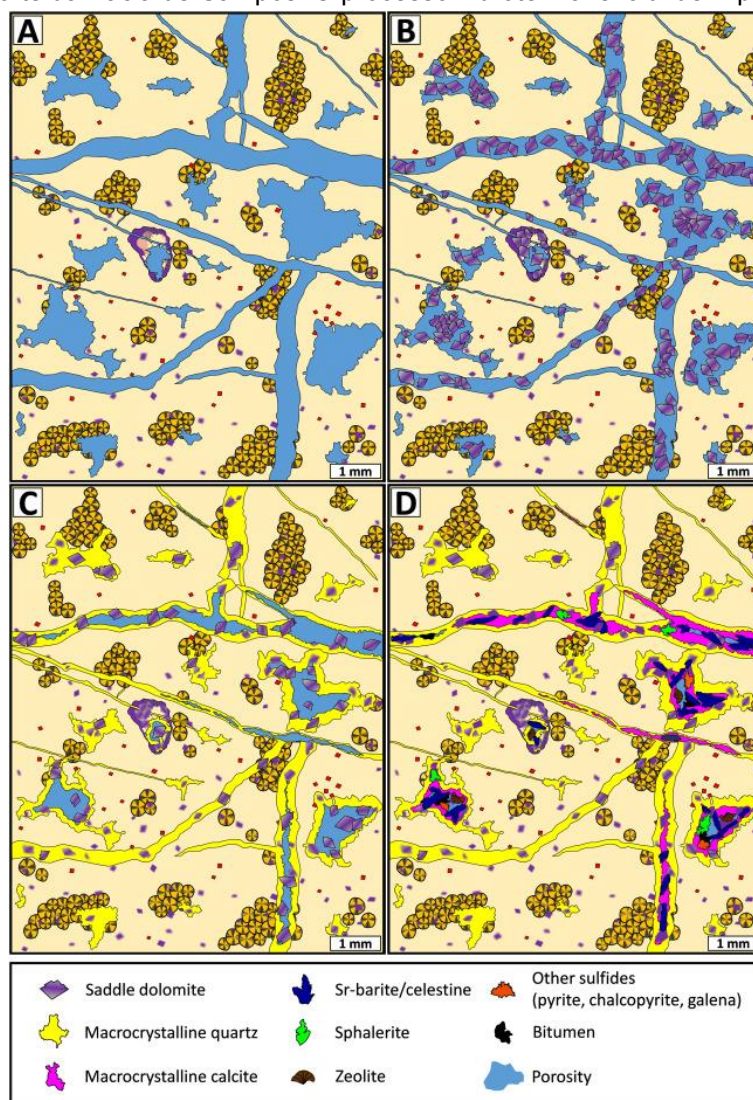
Fonte: Penna *et al.* 2019.

Com o trabalho de Penna e colaboradores mostra a relevante presença de rochas ígneas nos sistemas petrolíferos do Pré-Sal brasileiro. Já o estudo feito por Lima e colaboradores (2019) elucidou os processos diagenéticos nos reservatórios carbonáticos lacustres na porção norte da Bacia de Campos, mostrando que a principal porosidade nestes reservatórios é secundária, decorrente principalmente da eodiagenese que varia de acordo com a composição química de cada lago que existiu. Todavia, Lima e colaboradores (2019) mostraram que a medida que o soterramento ocorre, há eventos de incursão de líquidos hidrotermais, que geraram fraturas de corrosão nos carbonatos, como ilustrado na Figura 10. A explicação deles para a



existência dessa interação com fluidos hidrotermais é a presença de atividade magmática ou exumação do manto na Bacia de Campos durante o Cretáceo.

Figura 10 – Modelo esquemático da dissolução por líquidos hidrotermais em reservatórios carbonáticos do Pré-Sal brasileiro, norte da Bacia de Campos. O processo hidrotermal evolui de A para D.



Fonte: Lima *et al.* 2019.

Utilizando dessas informações anteriores o presente trabalho apresenta a Formação Irati na Bacia do Paraná, como um potencial análogo para como os calcários do Pré-Sal brasileiro podem ser modificados pela percolação de fluidos hidrotermais provenientes de eventos de intrusão de rochas ígneas.

## 4 RESULTADOS: ARTIGO PRODUZIDO

### Artigo: **DETERMINAÇÃO DAS ALTERAÇÕES PROVOCADAS PELAS INTRUSÕES ÍGNEAS NOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO IRATI**

O artigo será submetido para a revista *Journal of South American Earth Sciences*.

#### Resumo

A Formação Irati se destaca na Bacia do Paraná pelos folhelhos betuminosos, que são usados na Usina de Xisto da Petrobras em São Mateus do Sul e, como rocha-geradora de petróleo encontrado na Formação Rio Bonito, em vários poços subcomerciais, além da acumulação nos arenitos asfálticos da Formação Pirambóia na Fazenda Betumita em São Paulo. A Formação Irati, em praticamente toda a bacia, encontra-se intrudida por diabásios do Grupo Serra Geral. Essas intrusões ígneas em reservatórios constituídos por rochas sedimentares carbonáticas são um desafio à produção de hidrocarbonetos, pois além de alterarem o gradiente da temperatura local, elas podem gerar convecção de fluido e promover a percolação de líquidos magmáticos na rocha, que podem modificar sua mineralogia, textura, porosidade e permeabilidade naturais. O objetivo do presente trabalho é o de estudar as modificações que ocorreram nos calcários da Formação Irati devidos à essas intrusões. Para isso foram coletadas amostras em pedreiras nas cidades de Perolândia (Goiás) e Rio Claro (São Paulo). As amostragens foram realizadas em perfis verticais adjacentes às soleiras e aplicaram-se os métodos de Petrografia, Microscopia Eletrônica de Varredura, Difração de Raio X, Terra Rara, para determinar as alterações causadas pelas intrusivas. Com os resultados das relações de campo foi possível distinguir a diferença entre as consequências das soleiras na região de Goiás, onde é possível distinguir uma visível borda de metamorfismo térmico nos calcários circundantes a elas, e do que foi encontrado na região de São Paulo, onde o calcário periférico a intrusão apresenta um sutil metamorfismo térmico. Contudo, ainda na região de São Paulo, há cristalização de pirita macroscópica precipitada em planos preferencias: fraturas e acamamento dos calcários; foi possível ainda averiguar uma expressiva mudança na textura do calcário, onde surgem nódulos alongados horizontalmente com uma textura de mármore envoltos em uma auréola de substituição rica em argilominerais (lizardita e saponita) e talco, consequência da distribuição desigual do calor proveniente das intrusões. A petrografia evidencia uma mudança gradual na mineralogia do calcário a medida que se aproxima das intrusões, contudo ela só foi definida de forma efetiva com o uso da Difração de Raio X que demonstra o surgimento de pirita e talco nas áreas mais próximas das soleiras. Na petrografia foi possível ver também que houveram planos preferenciais de percolação de fluidos, que dissolveram o calcário, mas que posteriormente também proporcionou precipitação, que interferiu pouco na permeabilidade da rocha. As imagens do Microscopia Eletrônica de Varredura mostraram textura de corrosão no calcário, consequência da interação com os líquidos magmáticos. Tendo esta investigação sendo feita, foi possível

criar um modelo teórico de como as alterações se distribuem verticalmente e a área de abrangência das mesmas.

Palavras chaves: Carbonato, Bacia do Paraná, Formação Irati, Magmatismo, Reservatório, Metamorfismo de Contato.

### **Abstract**

The Irati Formation stands out in the Paraná Basin for the bituminous shales, which are used in the Petrobras Oil Shale Plant in São Mateus do Sul and as source-rock for oil-bearing rocks found in the Rio Bonito Formation in several subcommercial wells, in addition to the accumulation in the asphaltic sandstones of the Pirambóia Formation in the Betumita Farm in São Paulo. The Irati Formation, in practically the whole basin, is intruded by diabase of the Serra Geral Group. These igneous intrusions in reservoirs made up of carbonaceous sedimentary rocks are a challenge to the production of hydrocarbons, as well as altering the local temperature gradient, they can generate fluid convection and promote the percolation of magmatic fluids in the rock, which can modify its mineralogy, texture, porosity and permeability. The objective of this work is to study the modifications that occurred in carbonates of the Irati Formation due to these intrusions. For this, samples were collected in quarries in the cities of Perolândia (Goiás) and Rio Claro (São Paulo). Samplings were collected in vertical profiles adjacent to the sills and the Petrography, Scanning Electron Microscopy, X-Ray Diffraction, Rare Earth Elements methods were applied to determine the changes caused by intrusions. With the results it was possible to distinguish the difference between the consequences of the sills in the region of Goiás, where it is possible to distinguish a visible border of thermal metamorphism in the limestones surrounding them, and of what was found in the region of São Paulo, where the peripheral limestone intrusion presents a subtle thermal metamorphism. However, still in the region of São Paulo, crystallization of macroscopic pyrite precipitated in preference planes: fractures and limestone bedding; it was possible to investigate a significant change in the texture of the limestone, where there are horizontally elongated nodules with a marble texture enveloped in a substitution halo rich in clay minerals (lizardite and saponite) and talc, due to the uneven distribution of the heat from the intrusions. The petrography shows a gradual change in limestone mineralogy as it approaches the intrusions, but it was only effectively defined with the use of X-Ray Diffraction that demonstrates the appearance of pyrite and talc in the areas near the sills. In the petrography, it was possible to see that there were preferential plans of percolation of fluids, which dissolved the limestone, but later also provided the precipitation of the same, interfering little in the permeability of the rock. The Scanning Electron Microscopy images showed corrosion texture in the limestone, as a consequence of the interaction with the magmatic liquids. With this research being done, it was possible to create a theoretical model of how the changes are distributed vertically and the area of their coverage.

Keywords: Carbonate, Paraná Basin, Irati Formation, Magmatism, Reservoir, Contact Metamorphism.



## 4.1 Introdução

Nas últimas décadas o mercado de petróleo e gás tem dado maior atenção para modelos não-convencionais de *plays* produtores de hidrocarbonetos. O principal exemplo são os grandes volumes de gás produzido de folhelhos (gas-shale production) que são um sucesso e fizeram a produção de hidrocarbonetos norte-americana quase duplicar em relação a produção de 15 anos atrás. Muitos autores classificam sistemas petrolíferos influenciados por magmatismo como não-convencionais ou atípicos (Magoon & Dow, 1994), decorrente do fato da maior parte das ocorrências não serem comerciais.

As intrusões magmáticas em sistemas petrolíferos são um desafio à produção de hidrocarbonetos, seja qual for a natureza do reservatório, pois podem acarretar, dentre outras, a mudança do gradiente térmico local, metamorfismo de contato e até percolação de líquidos magmáticos com dissolução da rocha reservatório e mudança na diagênese, aumentando e/ou reduzindo a porosidade (Senger *et al.*, 2017). Diversas bacias sedimentares tiveram ao longo de sua história eventos magmáticos de natureza e intensidades diversas, sendo possível a associação de reservatórios não-convencionais às atividades ígneas. Essas atividades podem se apresentar de diversas formas em subsuperfície e em superfície (Figura 6) e os corpos ígneos intrusivos são os principais responsáveis por influenciarem os sistemas petrolíferos, podendo esta influência ocorrer em qualquer um dos elementos e processos do sistema petrolífero: maturação da matéria orgânica, migração de fluidos, modificação do reservatório e no trapeamento ou armadilha.

Nesse trabalho foram estudadas as intrusões ígneas entre as camadas da Formação Irati, com a identificação e caracterização das alterações presentes nos calcários dessa unidade geológica de acordo com a distância da intrusão. Os trabalhos de campo concentraram-se em pedreiras de extração de calcários, nas cidades de Rio Claro (SP) e Perolândia (GO) (Figura 1), com objetivo de entender como as alterações que ocorreram na Formação Irati estão distribuídas espacialmente e elaborar um modelo para explicar os mecanismos que influenciaram estas alterações na rocha.

## 4.2 Área de estudo

A Bacia do Paraná ocupa uma área de 1.100.000 km<sup>2</sup> e ocorre nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Minas

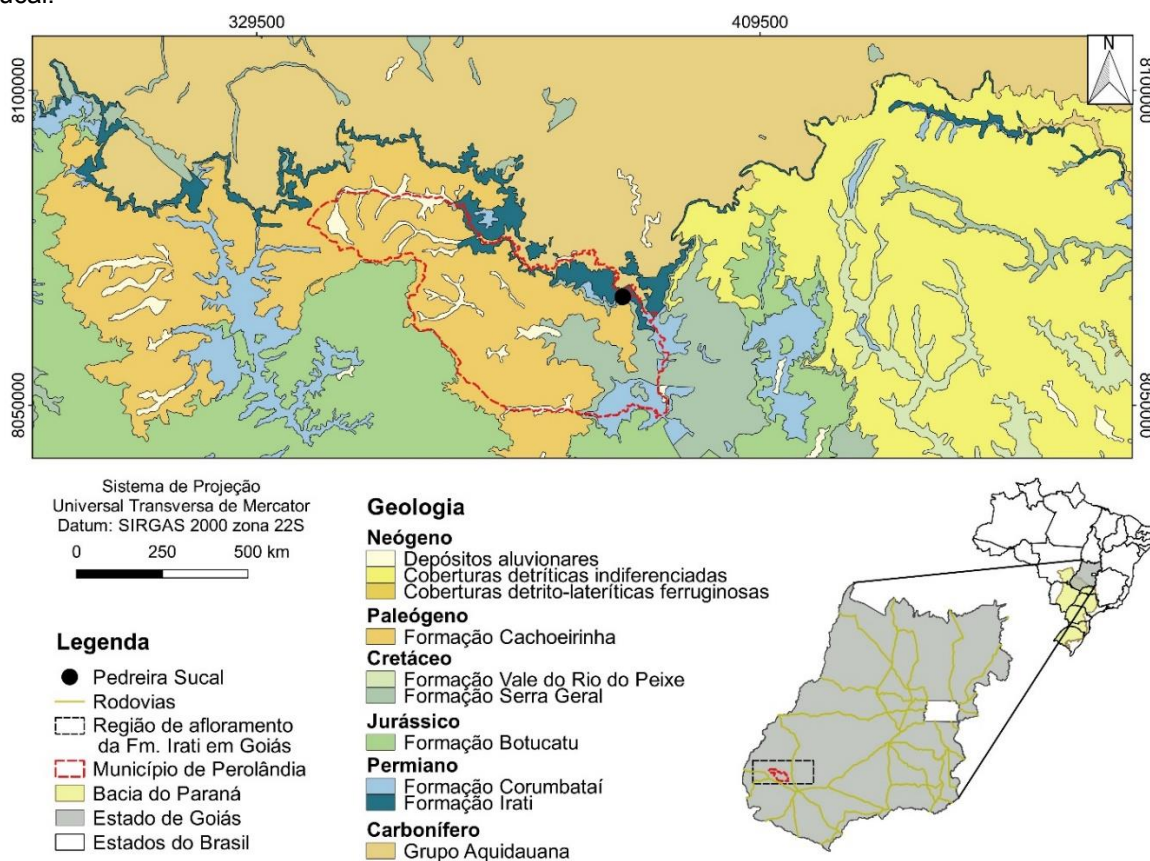
Gerais, Goiás e Mato Grosso, além de se estenderem pela Argentina, Paraguai e Uruguai (Milani, 2004). Dentre as unidades geológicas dessa bacia, a Formação Irati é o foco do presente trabalho e foi estudada nas cidades de Perolândia (GO) (Figura1) e Rio Claro (SP) (Figura2).

A sequência sedimentar em estudo está inserida na base do Grupo Passa Dois, ocorrem as formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rastro, que são constituídas majoritariamente por argilitos, folhelhos e siltitos (Schneider et al. 1974). A Formação Irati, unidade basal do grupo, está sobreposta as rochas da Formação Palermo do Grupo Guatá e está abaixo das rochas da Formação Serra Alta do Grupo Passa Dois. Essa formação do período Permiano é datada com uma idade artinskiana ( $278,4 \pm 2,2$  Ma), (Santos et al. 2006) pelo método da datação Shrimp U-Pb em zircões provenientes de camadas bentoníticas originadas da queda de cinza vulcânica e é subdivida em dois membros:

- *Membro Taquaral*: compõe a base da Formação Irati e marca o início da supersequência Gondwana I. O Membro Taquaral é composto basicamente por folhelhos silticos, cinza escuros. Localmente, no estado de São Paulo ocorrem finas camadas de arenito conglomerático com grânulos de sílex, dentes e fragmentos de ossos de peixes (Hachiro, 1996).
- *Membro Assistência*: presente no topo da Formação Irati, o Membro Assistência caracteriza-se por sua forte homogeneidade entre camadas essencialmente pelíticas, tendo um contato concordante na base com o Membro Taquaral e no topo com a Formação Serra Alta. O Membro Assistência possui folhelhos cinza escuros e folhelhos pretos betuminosos, associados a calcários e ocasionais evaporitos (Hachiro, 1996). Os estudos do presente trabalho se concentram no Membro Assistência.

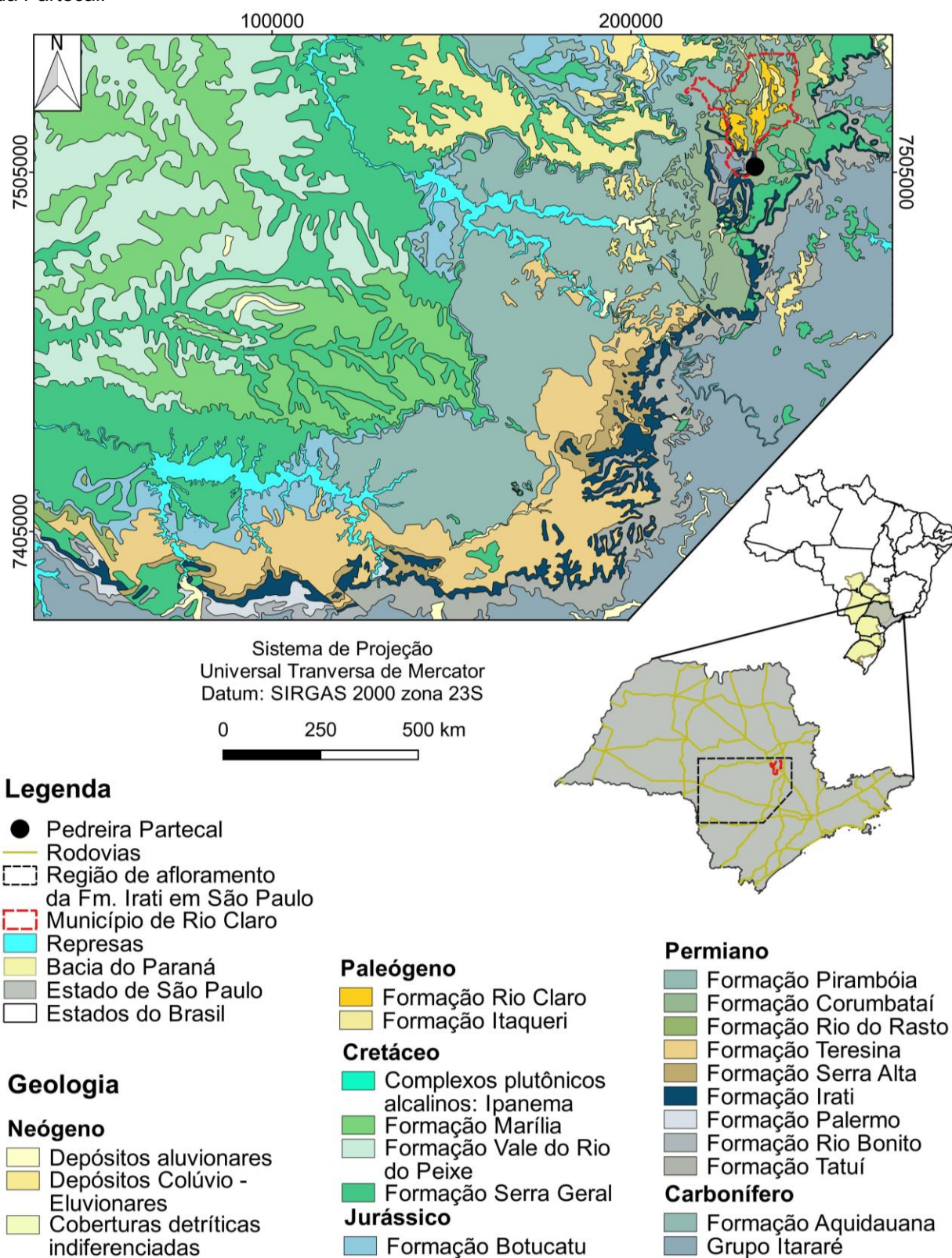
A Formação Irati é afetada por intrusões de diabásio do Grupo Serra Geral representados por diques e soleiras com espessuras de até 200 m (Corrêa, 2007). As espessuras dessas intrusões controlam os efeitos térmicos na rocha encaixantes, sendo os corpos ígneos de maior espessura os que possuem maior magnitude na alteração nas rochas da Formação Irati.

Figura 1 – Mapa geológico da região de Perolândia (GO) com a localização da área municipal e da Pedreira da Sugal.



Fonte: modificado de CPRM (2000).

Figura 2 – Mapa geológico da região de Rio Claro (SP) com a localização da área municipal e da Pedreira da Partecal.



Fonte: modificado de CPRM (2006).

### 4.3 Material e métodos

Kang Xu e colaboradores (2015) mostraram que investigações com métodos geoquímicos são eficientes para delimitar os tipos de alterações e a área de influência, decorrente das intrusões ígneas em reservatórios carbonáticos no noroeste da Bacia de Tarim na China. O presente trabalho segue, como base metodológica, as investigações de Kang Xu e colaboradores (2015).

Para a coleta das amostras na pedreira Partecal em Rio Claro e Sugal em Perolândia, a metodologia foi a mesma, seguir uma sistemática onde a coleta foi feita em perfis perpendiculares a soleira (Figura 3), com auxílio de trena para haver um controle da distância entre as amostras e a soleira. A primeira pedreira a ser visitada foi a Sugal em Goiás, onde foram coletadas 40 amostras, posicionadas abaixo das intrusões, pois todo material sobreposto já havia sido erodido ou explorado pela mineração. Já na pedreira Partecal em São Paulo, foi possível realizar coletas tanto acima quanto abaixo da intrusiva, com 25 amostras coletadas. O objetivo de se coletar amostras em dois locais distantes visa ao aumento da espacialização das alterações provocadas no calcário da Formação Irati, já que as influências das intrusivas podem ser distintas de um local para outro, dada as condições locais no momento da intrusão de cada corpo ígneo.

Todas as análises foram feitas no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), com exceção dos elementos traços, que foram analisados no laboratório mineral Bureau Veritas no Canadá.

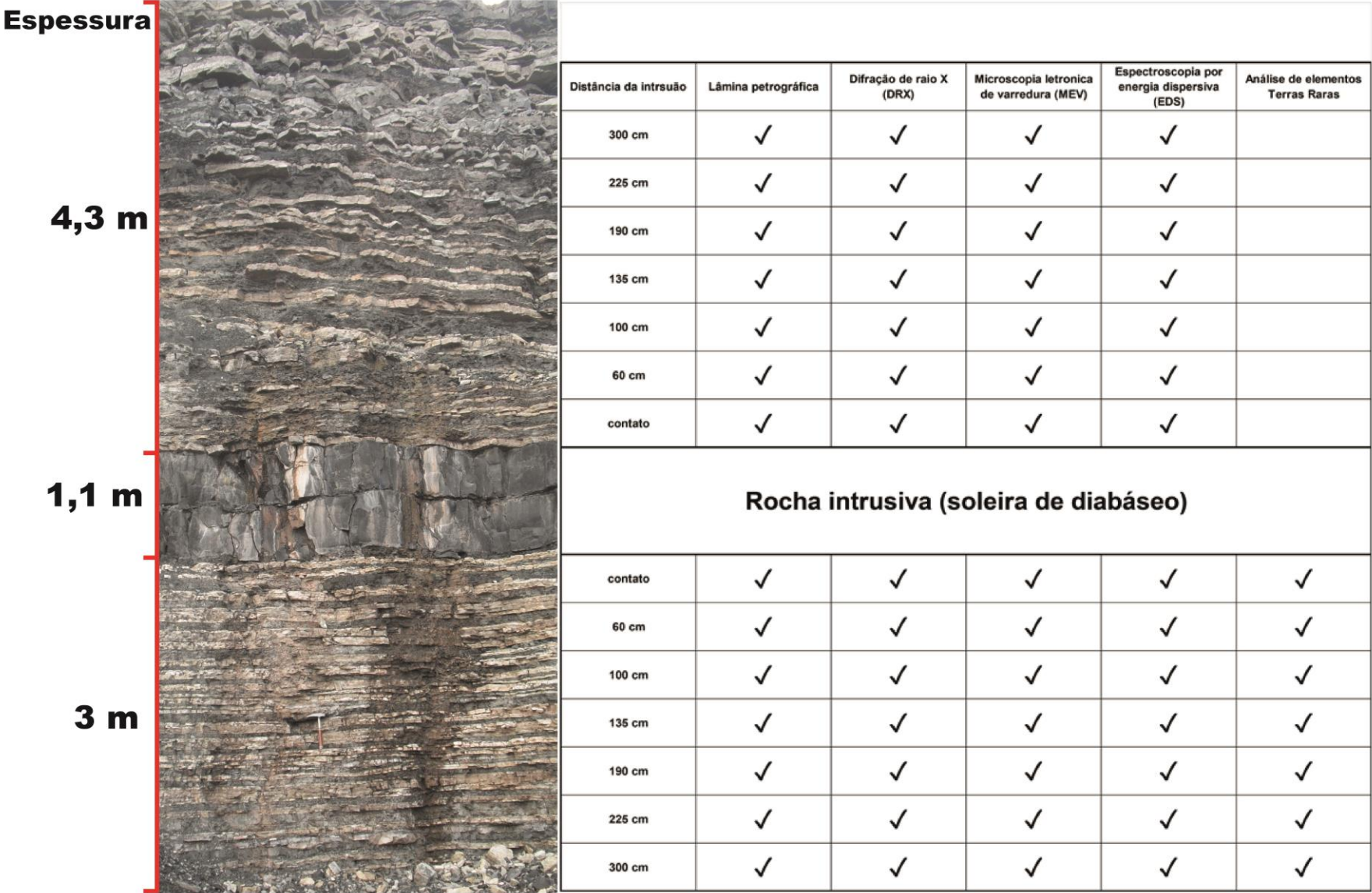
Para determinar as alterações aplicaram-se os métodos com os respectivos objetivos:

- Petrografia para determinar como a textura do calcário da Formação Irati muda à medida que se aproxima das intrusões;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi determinante para a descrição da textura dos argilominerais e análises químicas pontuais com auxílio da Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS);
- Difração de Raio X (DRX) para auxiliar na determinação da assembleia mineralógica, já que a granulometria é muito fina, a partir da metodologia de Alves (1987);

- Elementos Terras Raras foi mostrado por Kang Xu e colaboradores (2015) como eficientes para rastrear a distância que os líquidos hidrotermais alcançaram na encaixante.



Figura 3 - Foto esquemática de como foi a sistemática em campo para coleta de amostras, foto da frente de lavra em Rio Claro – SP.



## 4.4 Resultados e Discussões

### 4.4.1 Relações de campo

A descrição macroscópica e as relações de campo foram realizadas concomitantes a coleta de amostras, com a observação das rochas da Formação Irati conforme a proximidade de uma intrusão. As geometrias das intrusivas em ambos os locais de estudo são concordantes ao acamamento, conhecidas como soleiras.

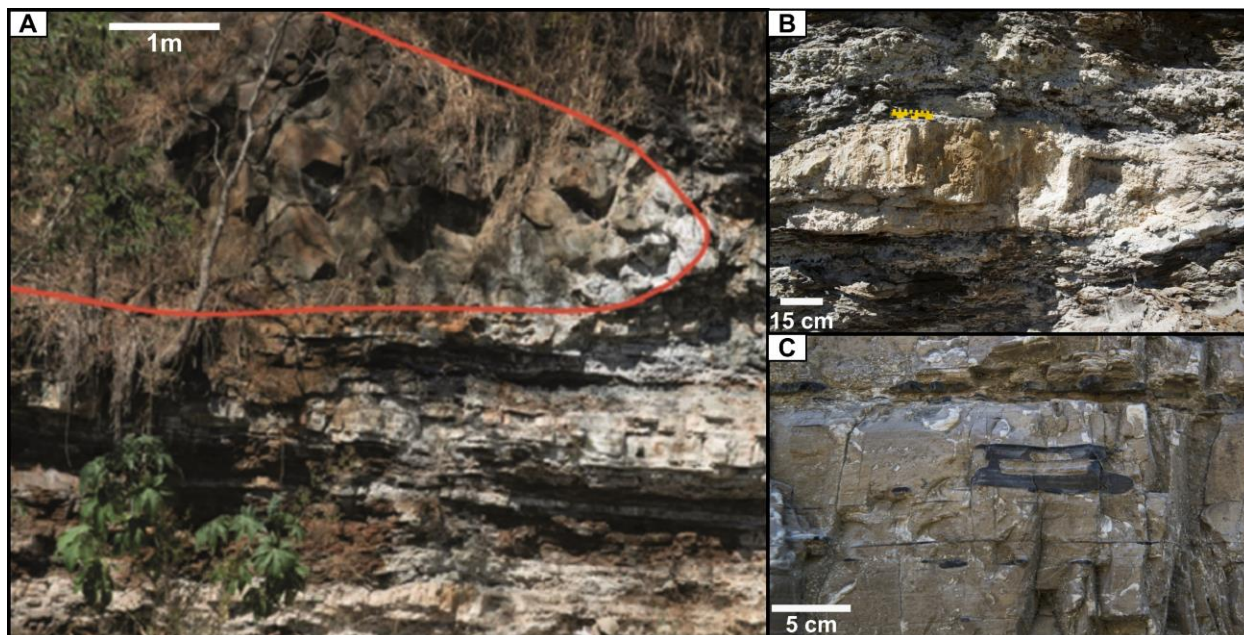
#### 4.4.1.1 Perolândia

Como a Figura 4 mostra, é possível distinguir na pedreira Sucal na cidade de Perolândia, que o metamorfismo de contato é bem visível à medida que se aproxima da intrusão, tanto o folhelho quanto o calcário ganham um envoltório esbranquiçado (Figura 4 a), além de se tornar bem mais friável (Figura 4 b) e apresentar precipitação de pirita. Contudo, o calcário que faz contato com a intrusão tem um aspecto compacto, denso e enegrecido, confirmado pelas análises das imagens de MEV (Figura 14). O metamorfismo de contato se distribui de forma homogênea circundante à intrusão, chegando a alcançar até 30cm, mas houve outros locais com um máximo de até 50cm.

O aspecto do calcário próximo a intrusão contrasta com o aspecto natural da Formação Irati na região, que é um calcário de coloração cinza claro a bege, intercalado com folhelhos negros e precipitações ocasionais de sílex (Figura 4).



Figura 4 – Foto de uma antiga frente de lavra da Sucal. Em (a) o contato entre a intrusiva com a Formação Irati realçado pela linha vermelha, em (b) calcário próximo a intrusão e em (c) calcário sem influência da intrusão.



#### 4.4.1.2 Rio Claro

Distinto do que foi encontrado em Perolândia, na pedreira Partecal em Rio Claro o metamorfismo de contato é mais sutil e não há formação do envoltório de alteração esbranquiçado observada em Perolândia (GO) (Figura 5 a).

Na região de Rio Claro foi possível notar que há uma diferença nas alterações provocadas pela intrusão na parte superior, diferente da parte inferior. A diferença é percebida na precipitação de pirita, onde na parte inferior elas são mais erráticas e menores, e na parte superior da soleira a pirita é euédrica, macroscópica e com nítida precipitação preferencial nos planos de fraturas e acamamento entre calcários (Figura 5 c).

Uma peculiaridade vista em Rio Claro foi a formação de nódulos alongados horizontalmente, envoltos em uma rocha enegrecida decorrente da substituição dos carbonatos por argilominerais ricos em magnésio e no centro o calcário com um aspecto marmoritizado (Figura 5 b). Estes nódulos foram encontrados numa porção abaixo da soleira principal, em torno de 6m, e eles podem ser consequência de uma distribuição

desigual do calor da soleira principal ou por consequência de uma outra soleira que não aflora.

Outra característica da Formação Irati em Rio Claro, na pedreira Partecal, é a presença de exsudações de petróleo que ocorrem principalmente nas fraturas das rochas (Figura 6).

Figura 5 – a) Frente de lavra da pedreira Partecal em Rio Claro (SP); b) nódulos diagenéticos que ocorrem nos arredores da intrusão; c) pirita euédrica precipitada entre os planos de acamamento dos carbonatos; d) aspecto dos carbonatos da Formação Irati na região.

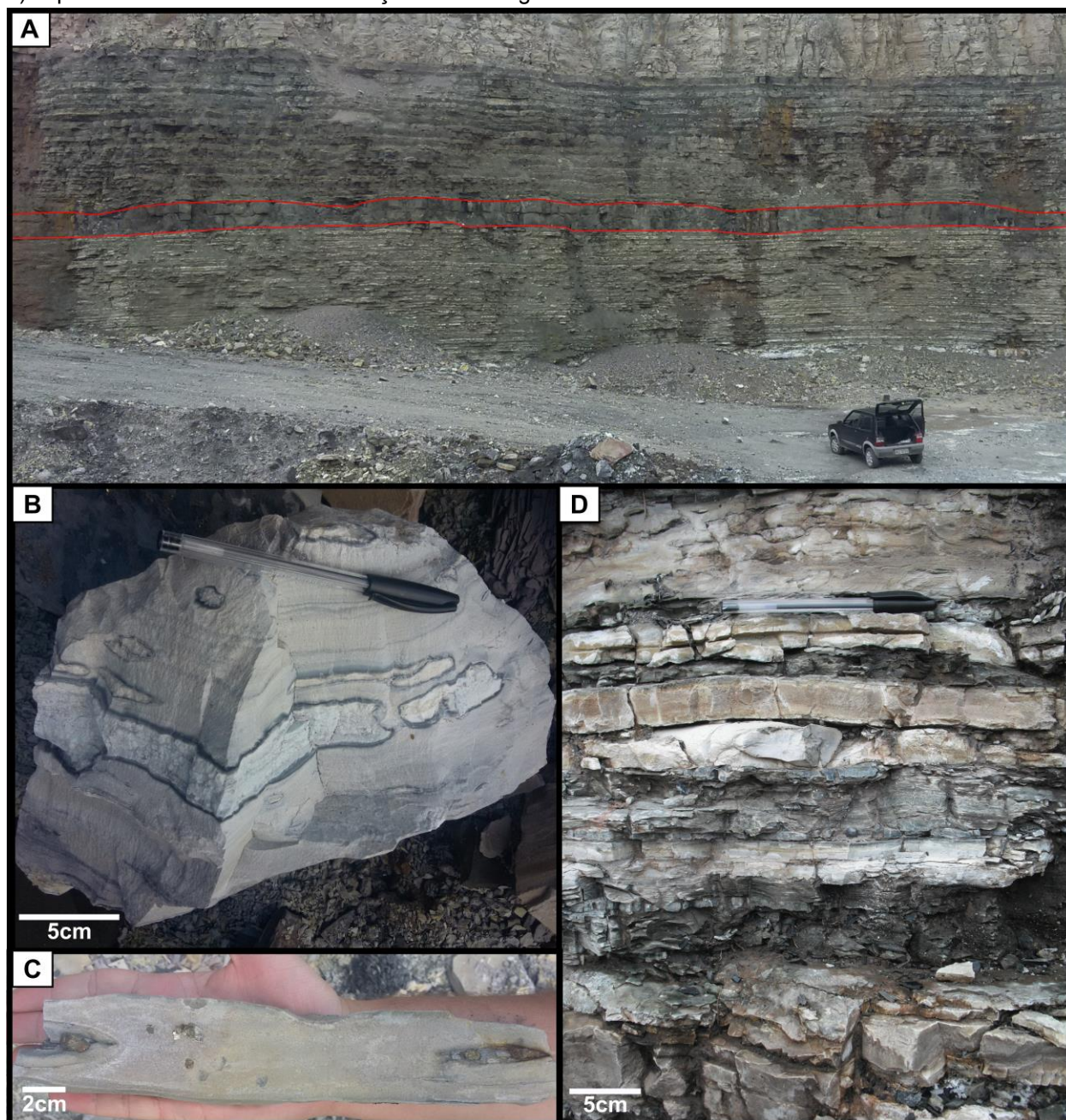




Figura 6 – Exsudação de petróleo na Formação Irati em Rio Claro (SP).



#### 4.4.2 Petrografia

Graças a investigação com petrografia foi possível averiguar mudança na textura do calcário à medida que se aproxima da intrusão (Figura 7), a matriz carbonática apresenta uma diferenciação de cristalinidade e os poros ficam preenchidos por uma mineralização posterior.

Essas feições de corrosão são consequência da percolação de fluidos magmáticos que dissolveram a dolomita primária da Formação Irati, mas como não houve um preenchimento volumoso de gás ou óleo, a diagênese posterior desfez a permeabilidade criada por essas feições de corrosão, com precipitação de argilominerais magnesianos (saponita e lizardita), talco, calcita diagenética e quartzo.

Figura 7 - Mosaico de fotos das amostras coletadas em Goiás: a) diabásio da soleira; b) calcário no contato com a soleira com capa ferruginosa de alteração; c) calcário a 30 cm da soleira mostrando a variação de cor; d) calcário distante suficiente da intrusão para não sofrer influência; e) lâmina petrográfica da soleira; f) lâmina petrográfica em luz polarizada do calcário próximo a intrusão e com minerais de textura mais grossa; g) lâmina petrográfica do calcário a 30 cm da intrusão; h) lâmina petrográfica do calcários da Formação Irati distante de intrusões.

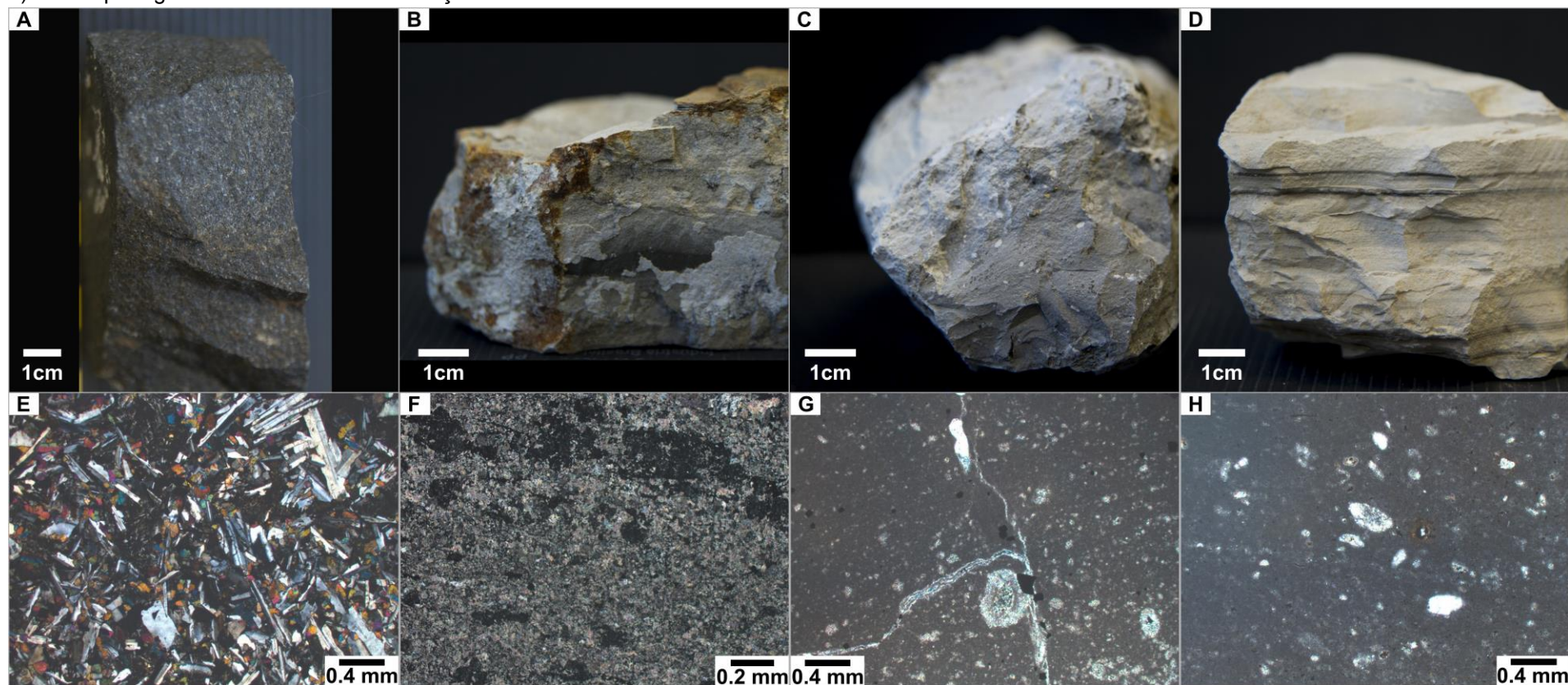
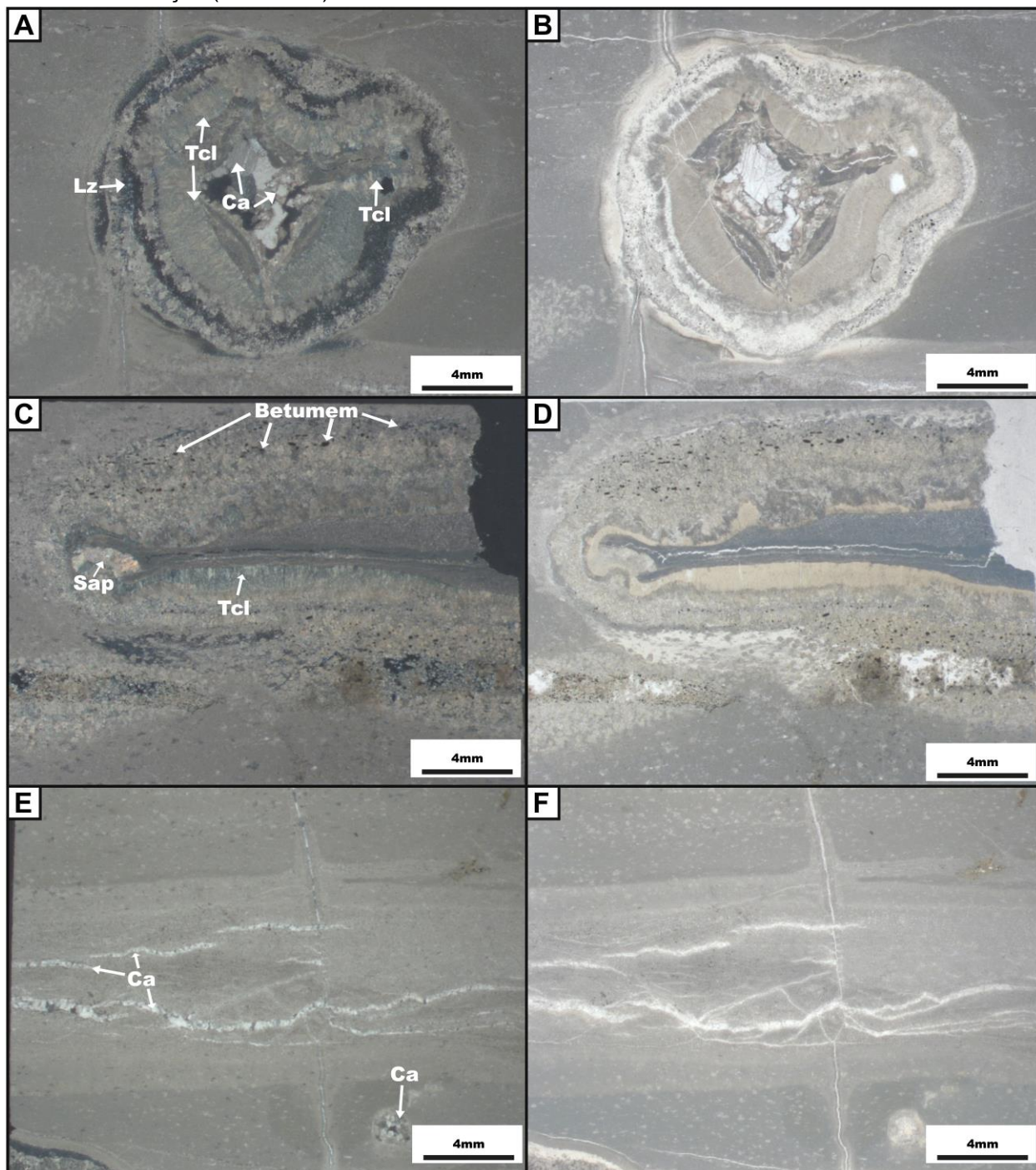




Figura 8 – Mosaico de fotos obtidas em uma mesma lâmina petrográfica, coletada a 1m da soleira, onde a) é a foto de um dos nódulos diagenéticos com dois estágios de crescimento, composto principalmente por talco (Tcl), lizardita (Lz) e calcita (Ca) (luz polarizada); b) mesmo nódulo digenético (luz natural); c) uma fratura de dissolução hidrotermal que cria uma auréola de alteração no entorno com forte argilização do calcário para talco e saponita (Sap) (luz polarizada), pontos pretos na parte superior são poros impregnados com betumem; d) mesma fratura de dissolução hidrotermal (luz natural); e) principal aspecto das falhas de dissolução, que se ramificam e são preenchidas por calcita (luz polarizada); f) aspectos das falhas de dissolução (luz natural).



Os nódulos diagenéticos (Figura 9 e Figura 10) são uma nítida consequência de como a distribuição de calor é desigual, e altera de maneira heterogênea a rocha encaixante, à medida que a distância da soleira aumenta. Na Figura 9 a é possível

perceber como os cristais de calcita (indicado pela sigla Ca) ficam maiores, dando um aspecto de calcitas presente em mármore. A presença dos nódulos em Rio Claro é muito maior que em Perolândia, possivelmente consequência das diferenças dos eventos magmáticos.

Figura 9 – Nódulo diagenético distante 6m da intrusão, intensa cristalização de calcita espática e substituição para argilominerais e talco, em a) nódulo inteiro na luz natural; b) nódulo inteiro na luz polarizada; c) detalhe do interior do nódulo inteiro na luz natural com a identificação dos minerais e d) detalhe do interior do nódulo inteiro na luz polarizada com a identificação dos minerais.

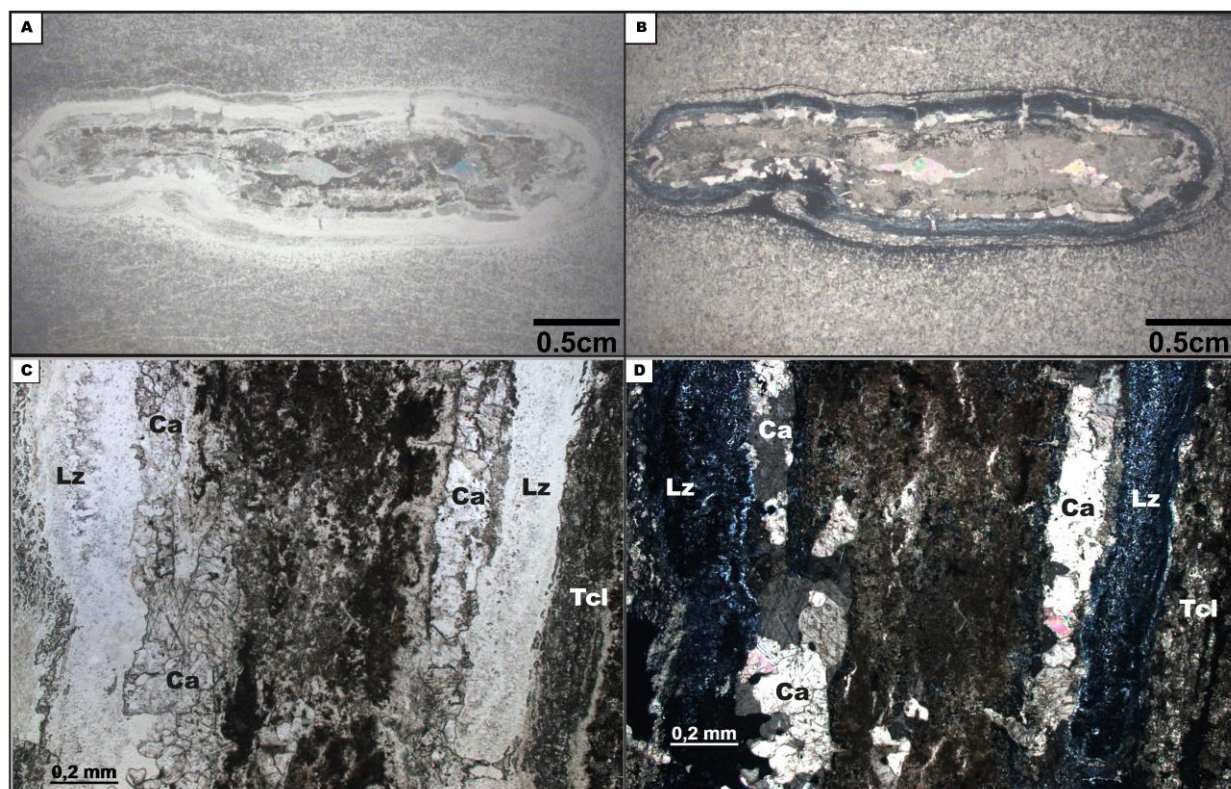




Figura 10 – Lâmina petrográfica no contato entre carbonato e folhelho, algumas fraturas de dissolução e grãos com as bordas impregnadas com betumem, a) luz natural; b) luz polarizada; c) carbonato fortemente argilizado entorno de uma fratura de dissolução (luz polarizada).

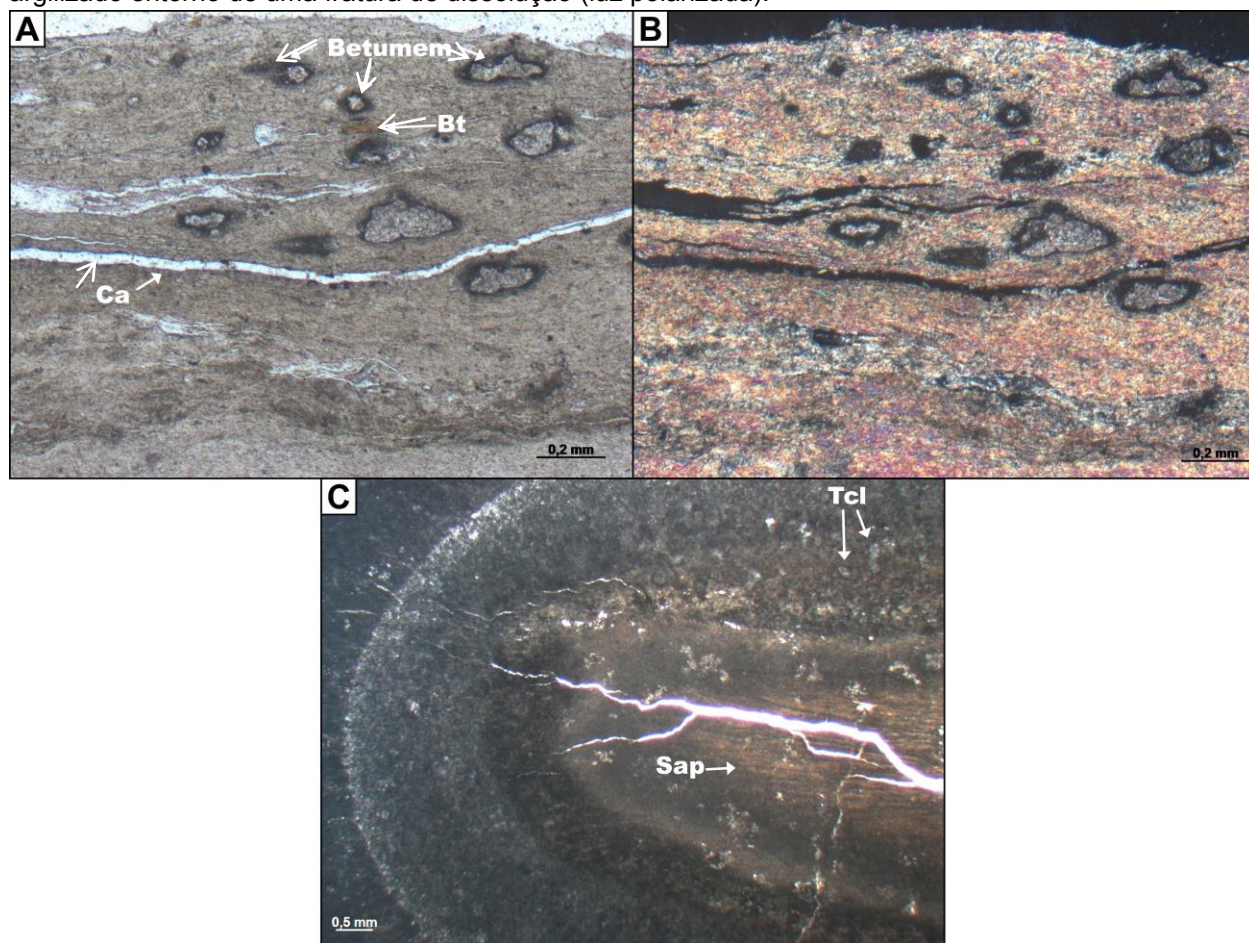


Figura 11 – Amostra coletada a 30cm da intrusão, possui a maior pungência de fraturas por dissolução, que se conectam a uma fratura principal (luz natural).

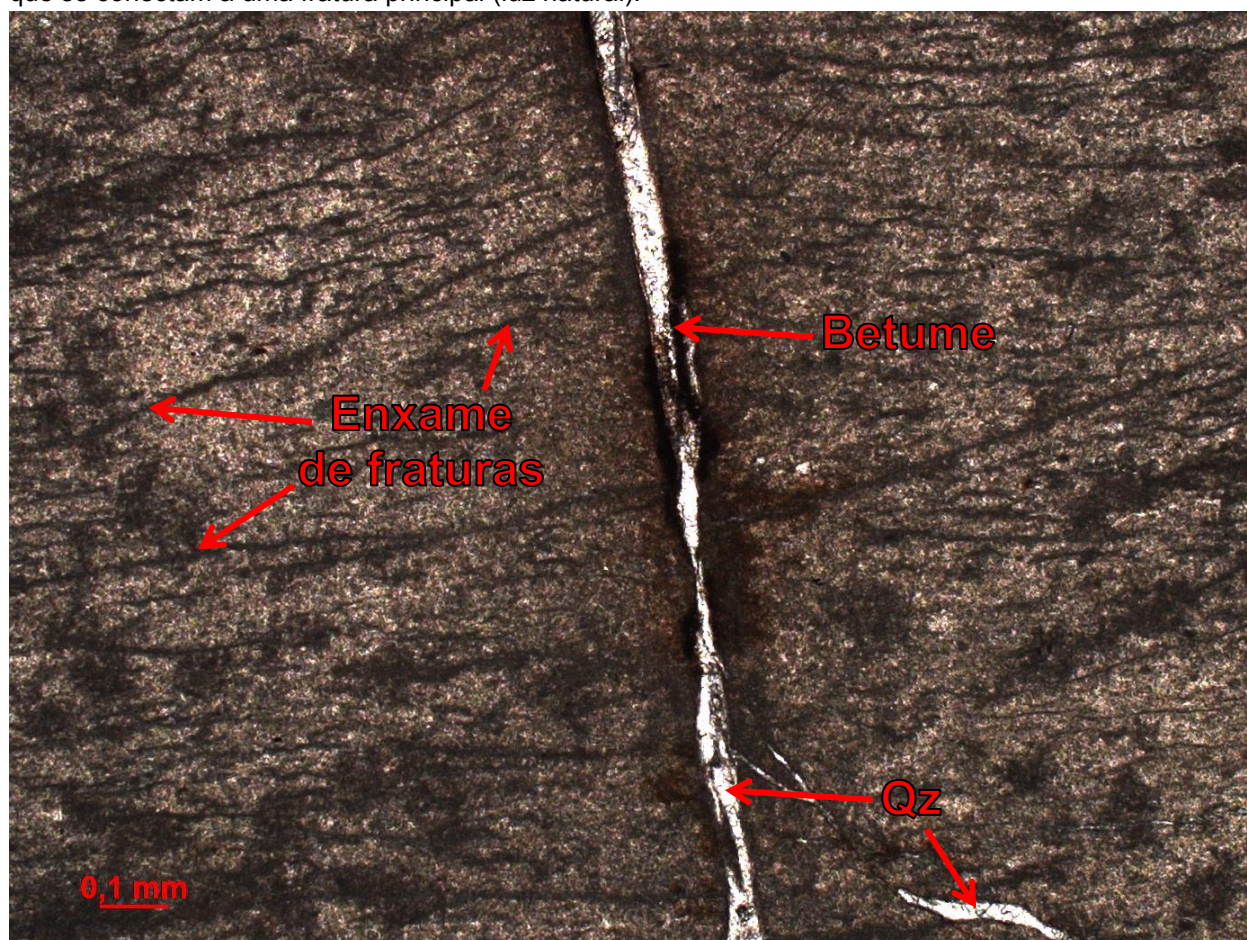
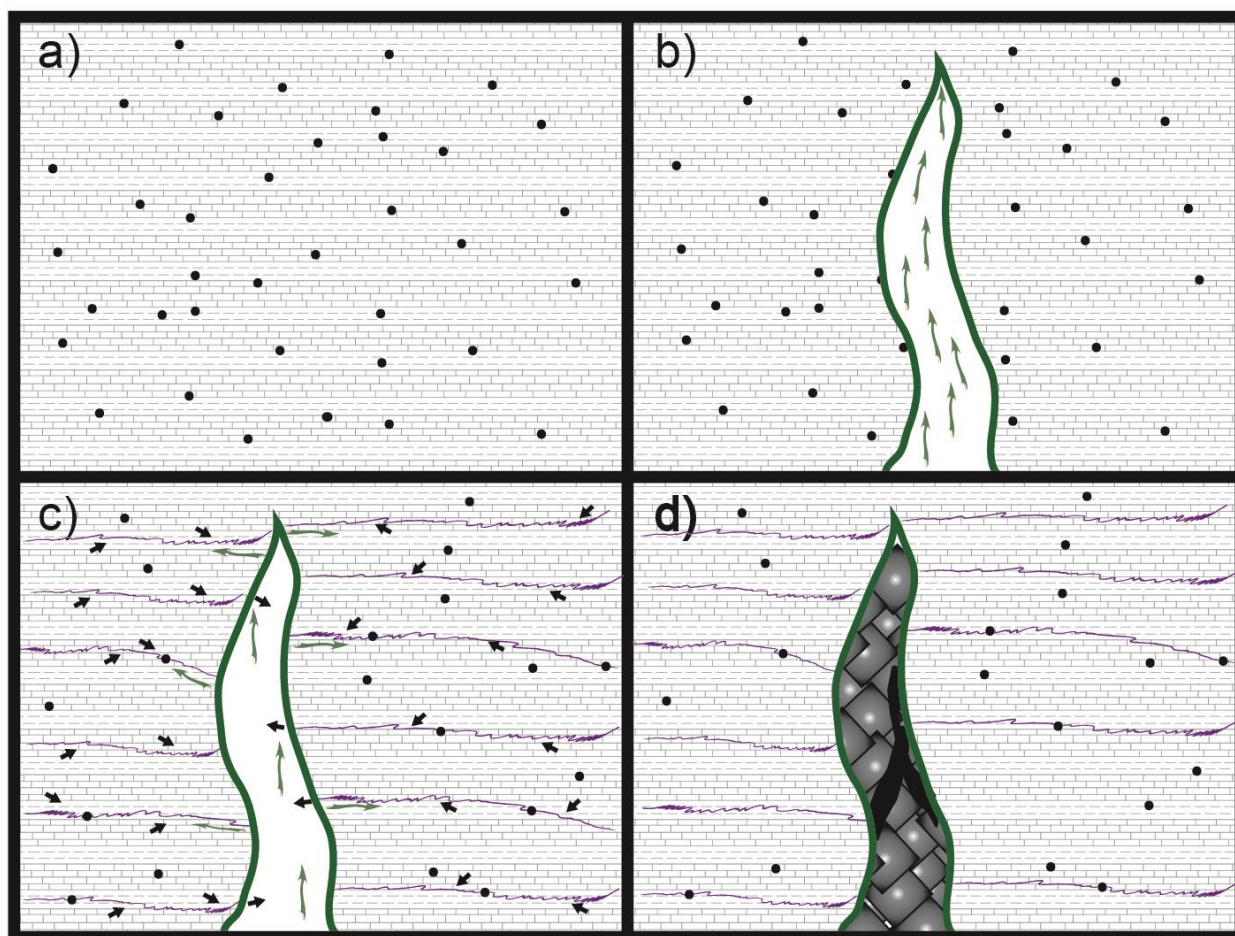




Figura 12 – Modelo de como as fraturas de dissolução foram preenchidas por petróleo, que com o tempo transformou-se em betumem, como visto na petrografia.



### Legenda

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

#### 4.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Na microscopia eletrônica foram observadas mudanças sutis na textura dos carbonatos da Formação Irati e com o uso da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) nas alterações químicas.

O calcário que faz contato com a intrusão tem feições de dissolução evidentes, e envolvendo os grãos há precipitação de argilominerais ricos em magnésio (Figura 14) (Tabela 1), decorrentes da alteração provocada pela intrusão.

O EDS na lâmina petrográfica (Figura 15) mostra como é a distribuição química nessas feições de corrosão, na borda dessas fraturas de corrosão precipita

argilominerais magnesianos e quartzo, já nas cavidades predomina pirita e calcita, interpretados a partir da análise dos óxidos (Tabela 1) e análise petrográfica.

Existe um padrão para composição dos nódulos diagenéticos (Figura 17) (Tabela 3), onde no centro crescem grandes cristais de calcita e para as bordas de forma concêntrica depositam-se intercalações de minerais (talco) e argilominerais magnesianos (saponita e lizardita). Em alguns locais há precipitação de gipsita em pequenas cavidades como visto no ponto 001 da Figura 16.

Figura 13 - Canto superior esquerdo amostra do calcário no contato com a soleira, usado nas amostras, canto superior [??? melhorar](#).

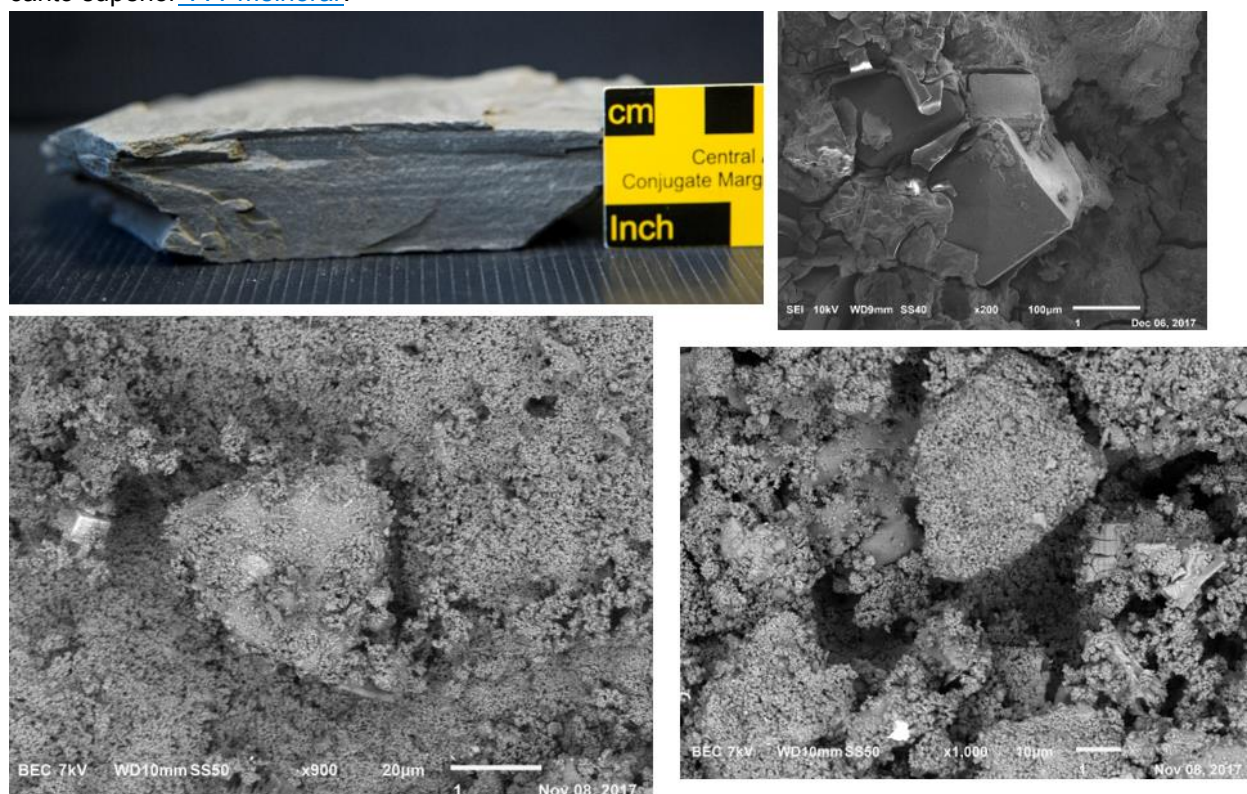


Figura 14 – Amostra coletada em Perolândia (GO) afastada 6m da soleira. Na esquerda uma lâmina petrográfica a luz polarizada, com uma cavidade totalmente preenchida por calcita (Ca), uma auréola de alteração entorno da cavidade com forte precipitação de pirita (Py) e uma fratura de dissolução conectada

a cavidade com forte precipitação de argilominerais magnesianos. Foto a direita de um MEV da mesma amostra com os pontos de EDS.

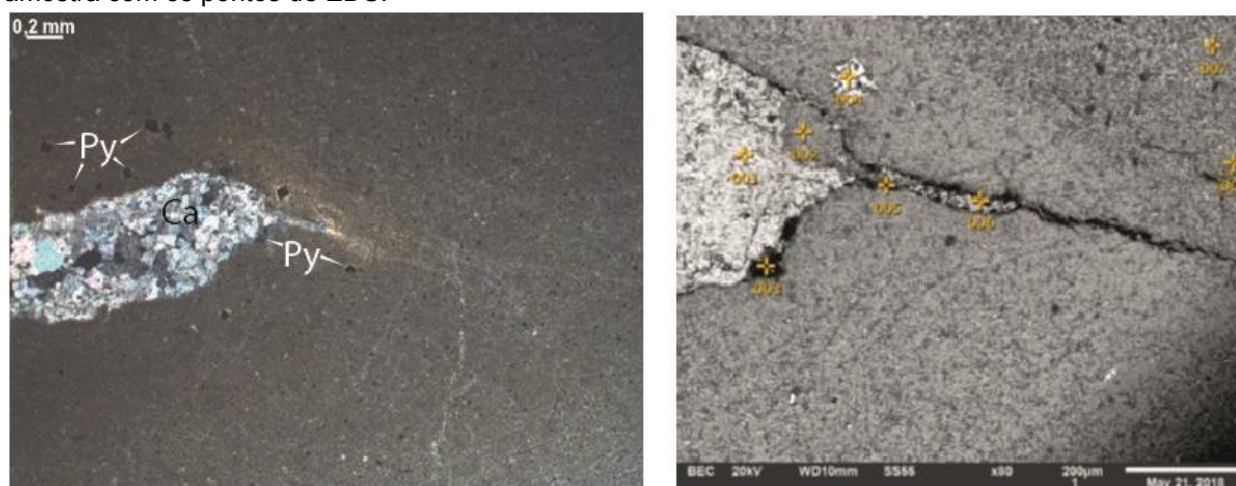


Tabela 1 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS.

| Pontos | CaO   | MgO   | SiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | FeO   |
|--------|-------|-------|------------------|-----------------|-------|
| 1      | 83,79 | 7,77  | 8,44             | -               | -     |
| 2      | -     | 45,09 | 54,91            | -               | -     |
| 3      | -     | 28,61 | 71,39            | -               | -     |
| 4      | -     | 4,71  | 5,4              | 56,02           | 33,87 |
| 5      | -     | 38,81 | 61,19            | -               | -     |
| 6      | 30,02 | 28,46 | 41,52            | -               | -     |
| 7      | 21,87 | 41,42 | 36,71            | -               | -     |
| 8      | 4,84  | 44,45 | 50,71            | -               | -     |



Figura 15 – Foto do MEV de uma amostra coletada em Perolândia (GO) coletada a 3m da intrusão, com gipsita (ponto 001) e argilominerais (002), como visto na foto na parte inferior e dados químicos analisados com EDS.

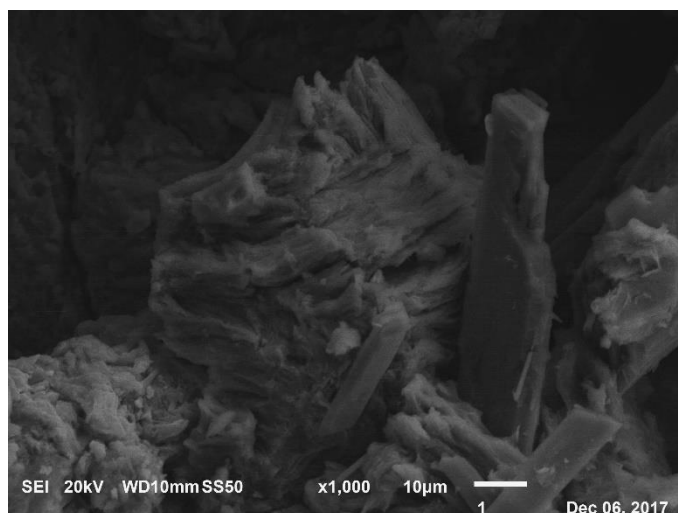
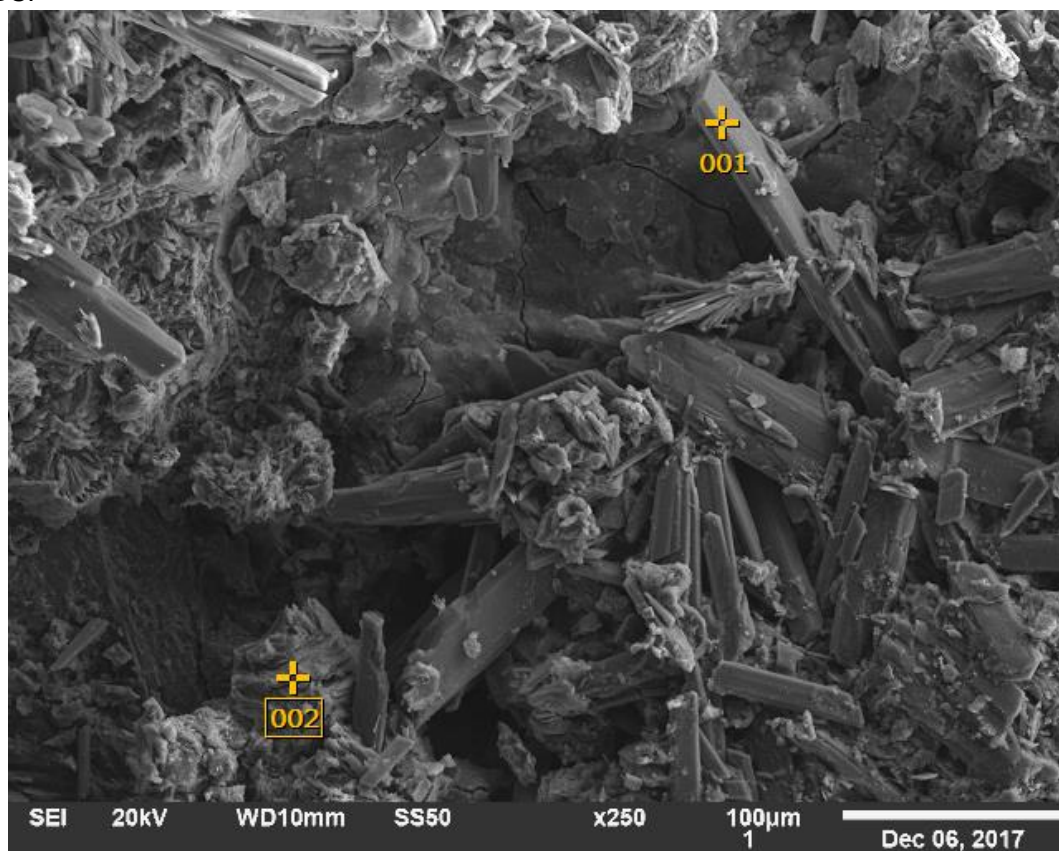


Tabela 2 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS.

| Pontos | Fe    | Mg    | Al   | Si    | S     | Ca    | O     |
|--------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1      | -     | -     | -    | -     | 15,76 | 17,16 | 67,07 |
| 2      | 10,34 | 14,54 | 2,73 | 20,33 | -     | -     | 52,05 |

Figura 16 – Foto do MEV de uma amostra com nódulo diagenético coletada em Rio Claro (SP) a 1m da soleira, mostrando como é a variação química da borda para o centro analisados com EDS.

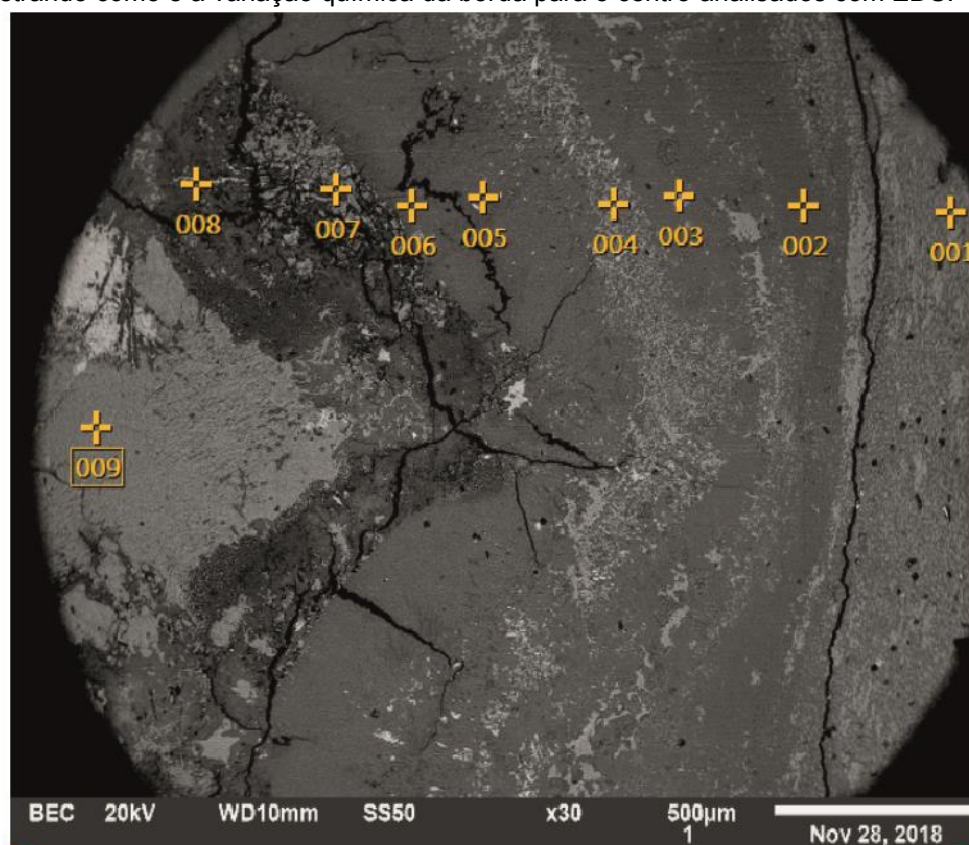




Tabela 3 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS.

| Pontos | CaO   | MgO   | SiO <sub>2</sub> | C     | MnO  | F     | FeO |
|--------|-------|-------|------------------|-------|------|-------|-----|
| 1      | 20,82 | 23,46 | 21,76            | 33,96 | -    | -     | -   |
| 2      | -     | 46,47 | 28,09            | 23,94 | -    | -     | 1,5 |
| 3      | 66,75 | 3,69  | 1,58             | 27,97 | -    | -     | -   |
| 4      | 4,18  | 24,17 | 20,07            | 49,99 | 1,59 | -     | -   |
| 5      | 1,12  | 31,89 | 27,45            | 39,54 | -    | -     | -   |
| 6      | 2,88  | 32,74 | 29,25            | 35,12 | -    | -     | -   |
| 7      | 67,4  | 3,73  | 9,55             | 19,32 | -    | -     | -   |
| 8      | 32,66 | 10,58 | 8,85             | 28,41 | -    | 19,49 | -   |
| 9      | 71,25 | 1,92  | 1,43             | 25,41 | -    | -     | -   |

Figura 17 – Mosaico de imagens de uma amostra 213-18-07 com uma fratura de dissolução e forte argilização, coletada em Rio Claro (SP) a 1m da soleira, a) lâmina petrográfica (luz polarizada); b) zoom no MEV na região fortemente argilizada; c) aspecto das argilas em lâmina.

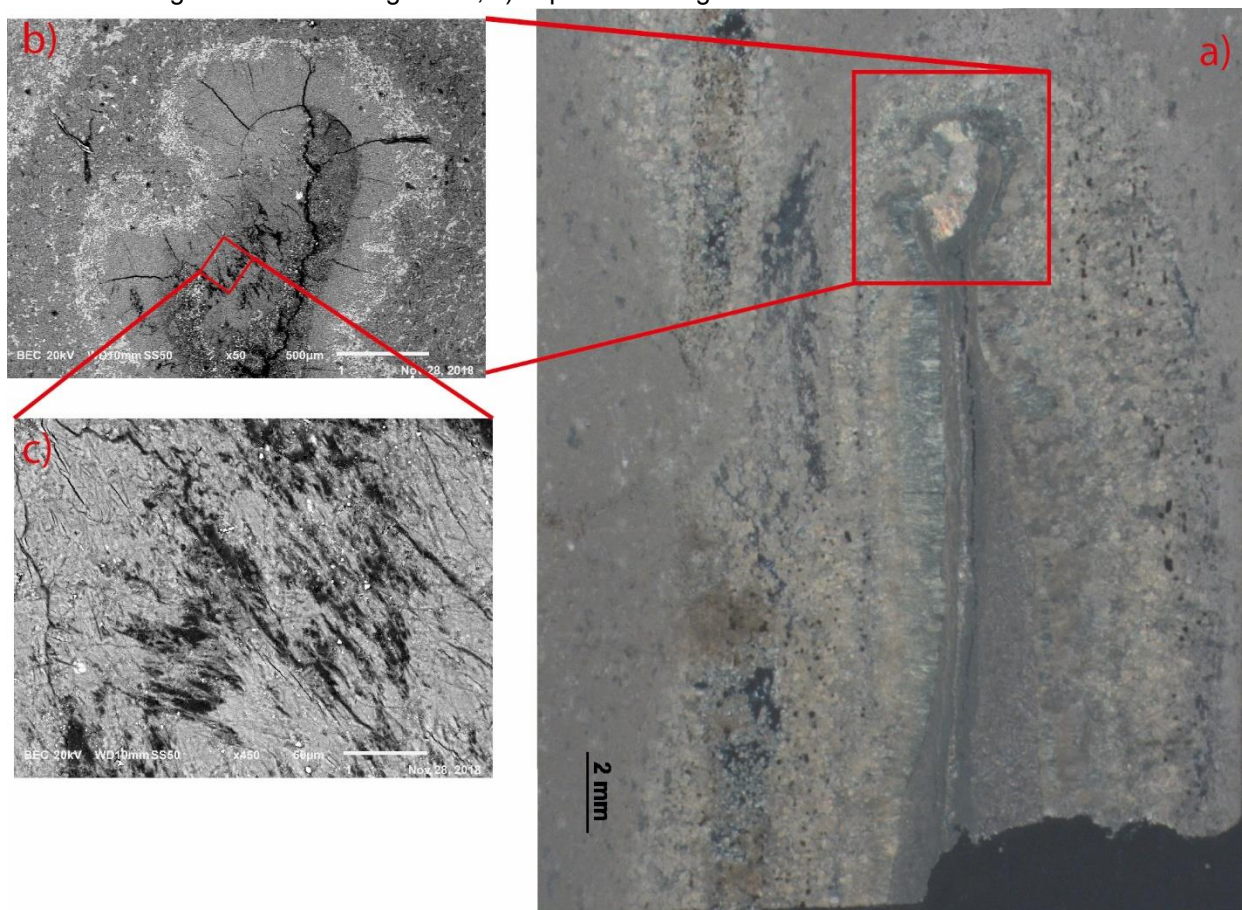


Figura 18 – Foto do MEV da amostra 213-18-07, com os pontos analisados com EDS.

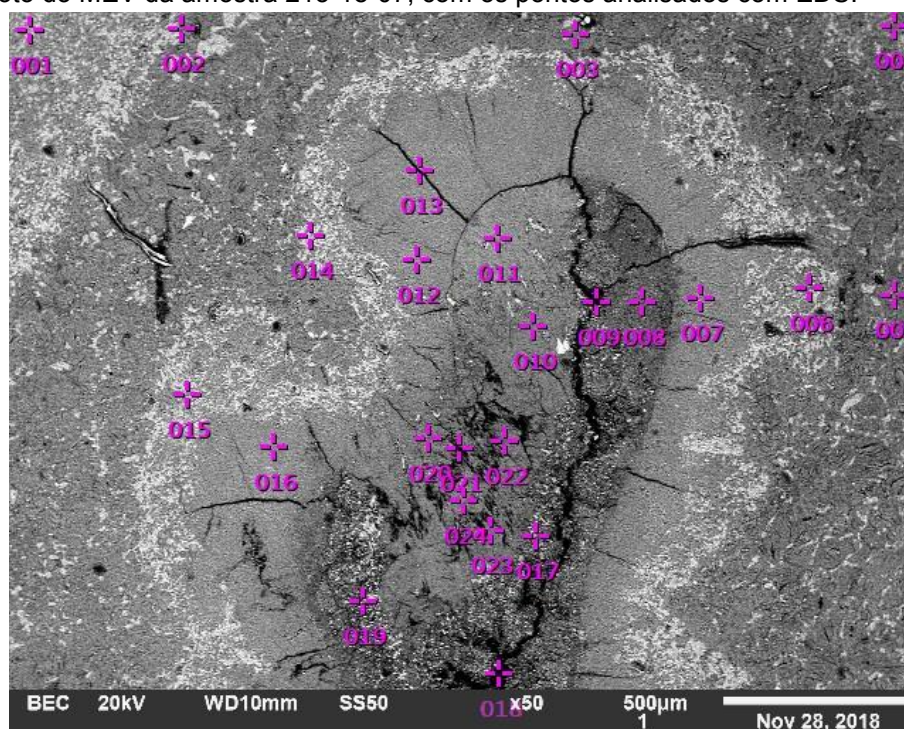


Tabela 4 – Dados químicos gerados da amostra anterior com EDS.

| Pontos | CaO   | MgO   | SiO <sub>2</sub> | C     | MnO  | FeO  |
|--------|-------|-------|------------------|-------|------|------|
| 1      | 53,7  | 10,78 | 6,78             | 28,74 |      |      |
| 2      | 2,34  | 24,32 | 25,46            | 45,27 | -    | 2,61 |
| 3      | -     | 44,21 | 24,75            | 31,05 | -    | -    |
| 4      | -     | 34,54 | 21,91            | 43,55 | -    | -    |
| 5      | 1,04  | 20,47 | 19,8             | 56,87 | -    | 1,82 |
| 6      | 48,33 | 4,52  | 2,49             | 44,66 | -    | -    |
| 7      | 4,04  | 26,08 | 27,47            | 37,01 | 2,25 | 3,15 |
| 8      | 3,59  | 16,35 | 18,11            | 60,31 | -    | 1,64 |
| 9      | 8,62  | 16,06 | 16,97            | 56,88 | -    | 1,47 |
| 10     | 1,27  | 23,45 | 23,64            | 51,63 | -    | -    |
| 11     | -     | 28,04 | 32,96            | 36,46 | -    | 2,53 |
| 12     | 2,96  | 28,95 | 29,33            | 36,54 | -    | 2,22 |
| 13     | 1,31  | 27,93 | 27,9             | 42,86 | -    | -    |
| 14     | 72,89 | 4,56  | 3,68             | 18,88 | -    | -    |
| 15     | 8,64  | 26,21 | 22,52            | 40,1  | -    | 2,53 |
| 16     | 2,67  | 31,32 | 32,12            | 27,21 | 3,19 | 3,48 |
| 17     | 9,93  | 11,85 | 14,85            | 62    | -    | 1,38 |
| 18     | 16,3  | 9,72  | 14,32            | 59,65 | -    | -    |
| 19     | 10,77 | 11,97 | 12,88            | 64,37 | -    | -    |
| 20     | -     | 23,09 | 24,47            | 49,82 | -    | 2,62 |
| 21     | -     | 25,6  | 23,66            | 50,74 | -    | -    |
| 22     | -     | 23,73 | 24,32            | 51,05 | 0,9  | -    |
| 23     | -     | 22,14 | 22,24            | 55,62 | -    | -    |
| 24     | -     | 25,82 | 25,68            | 47,53 | 0,98 | -    |



Figura 19 – Foto do MEV da amostra da Figura 9, com os pontos analisados com EDS.

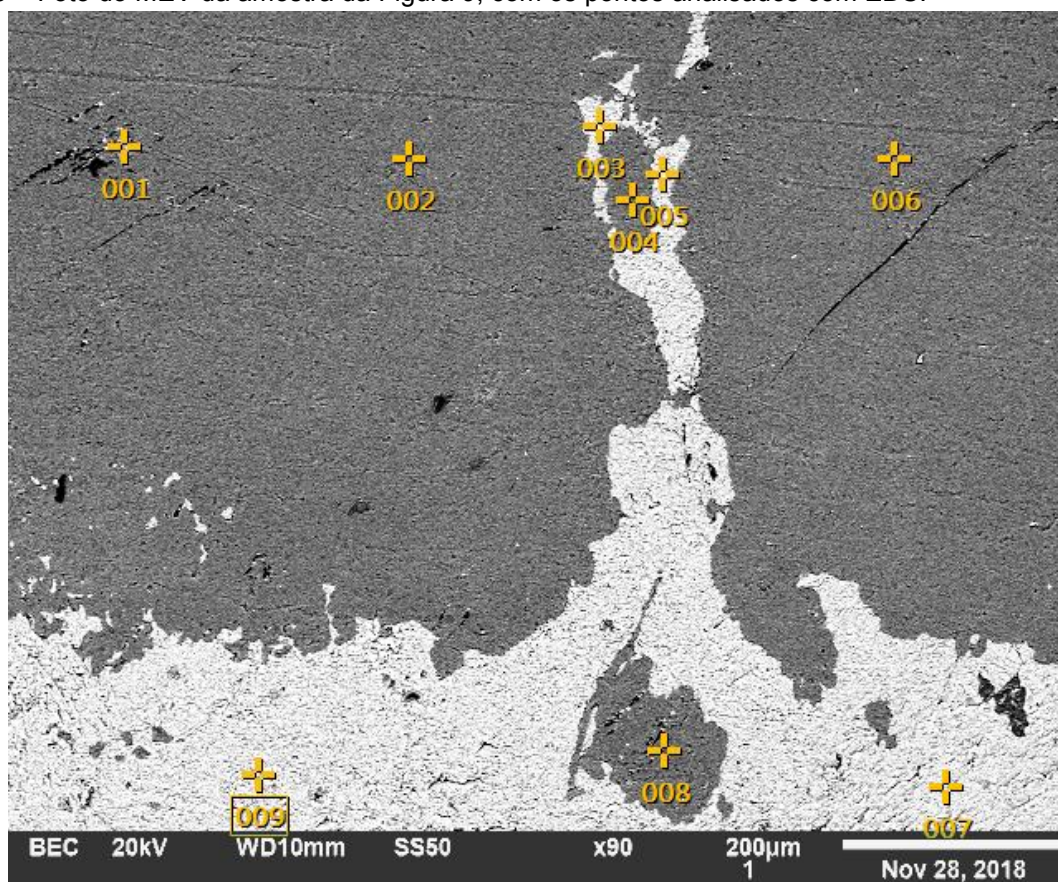


Tabela 5 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS.

| Pontos | CaO   | MgO   | SiO <sub>2</sub> | C     |
|--------|-------|-------|------------------|-------|
| 1      | -     | 33    | 19,34            | 47,66 |
| 2      | -     | 48,81 | 27,19            | 24,01 |
| 3      | 77,68 | 1,17  | 0,62             | 20,53 |
| 4      | -     | 47,71 | 26,01            | 26,28 |
| 5      | 14,51 | 39,61 | 20,13            | 25,76 |
| 6      | -     | 48,27 | 27,13            | 24,6  |
| 7      | 79,45 | -     | -                | 20,55 |
| 8      | -     | 45,55 | 25,65            | 28,8  |
| 9      | 75,26 | -     | 0,89             | 23,85 |



Figura 20 com os pontos analisados com EDS

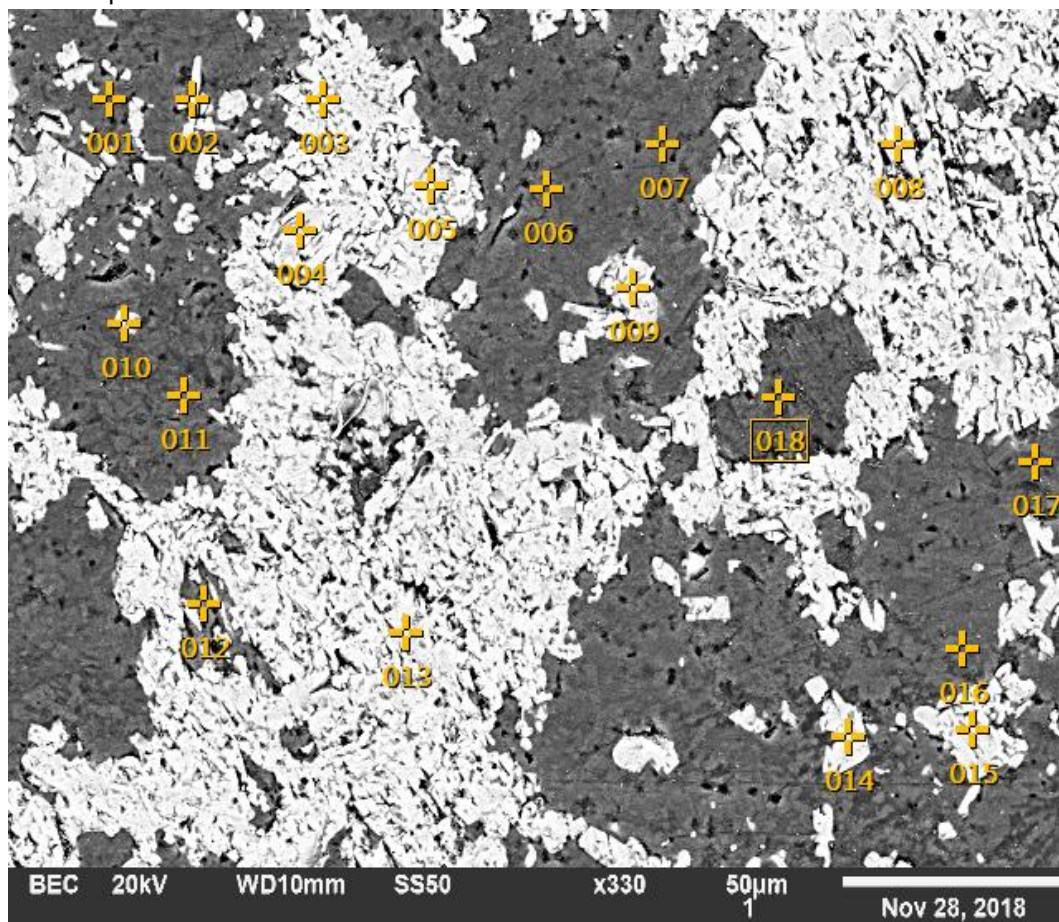


Tabela 6 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS..

| Pontos | CaO   | MgO   | SiO <sub>2</sub> | C     |
|--------|-------|-------|------------------|-------|
| 1      | -     | 43,3  | 24,38            | 32,32 |
| 2      | 70,92 | 3,54  | 1,85             | 23,7  |
| 3      | 73,36 | -     | -                | 26,64 |
| 4      | 74,6  | -     | -                | 25,4  |
| 5      | 71,33 | -     | 1,23             | 27,44 |
| 6      | -     | 41,67 | 22,84            | 35,49 |
| 7      | -     | 38,47 | 21,21            | 40,32 |
| 8      | 70,64 | -     | 1,35             | 28,01 |
| 9      | 76,13 | -     | -                | 23,87 |
| 10     | 73,38 | 1,95  | 1,52             | 23,16 |
| 11     | -     | 43,33 | 24,28            | 32,39 |
| 12     | 34,54 | 30,66 | 17,3             | 17,51 |
| 13     | 77,53 | -     | -                | 22,47 |
| 14     | 74,67 | -     | 0,57             | 24,76 |
| 15     | 72,77 | -     | 0,88             | 26,36 |
| 16     | 1,01  | 39,95 | 22,04            | 37    |
| 17     | -     | 39,29 | 21,13            | 39,58 |
| 18     | -     | 34,42 | 18,45            | 47,13 |

Figura 21 – Foto do MEV de uma amostra com nódulo diagenético coletada em Perolândia (GO) coletada a mais de 8m da intrusão, com os pontos analisados com EDS

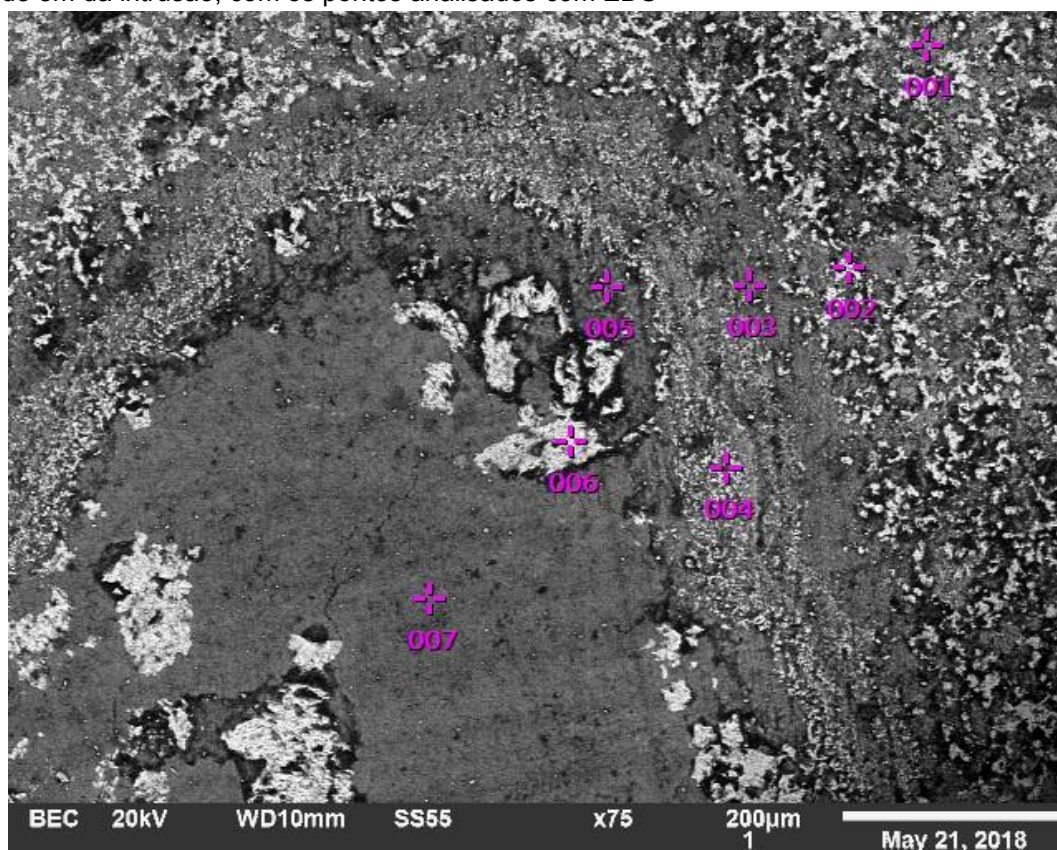


Tabela 7 – Dados químicos gerados da amostra anterior analisados com EDS..

| Pontos | CaO   | MgO   | SiO <sub>2</sub> | MnO  |
|--------|-------|-------|------------------|------|
| 1      | 3,35  | 55,69 | 40,97            | -    |
| 2      | 46,01 | 29,4  | 24,59            | -    |
| 3      | -     | 56,05 | 43,95            | -    |
| 4      | 29,02 | 39,37 | 31,61            | -    |
| 5      | -     | 56,47 | 43,53            | -    |
| 6      | 95,66 | -     | 3,06             | 1,28 |
| 7      | -     | 56,73 | 43,27            | -    |

#### 4.4.4 Difração de Raio X (DRX)

Anjos (2008) mostrou que os principais argilominerais diagenéticos encontrados principalmente nos folhelhos da Formação Irati são :nontronita, saponita, caolinita, illita, montmorilonita e clorita. Já o presente trabalho foca nos argilominerais precipitados nas camadas de carbonatos da Formação Irati. A Figura 23 mostra um carbonato típico da

Formação Irati, onde a principal mudança que ocorre é a evolução da calcita como principal carbonato para a dolomita, clássico processo de dolomitização, que evolui com o soterramento.

Já nas imagens dos difratogramas apresentados na sequência (Figura 24 até Figura 27) demonstram o surgimento gradual de argilominerais magnesianos e talco, a medida que os carbonatos se aproximam da soleira.

Figura 22 – Difratograma de um carbonato sem influência ígnea.

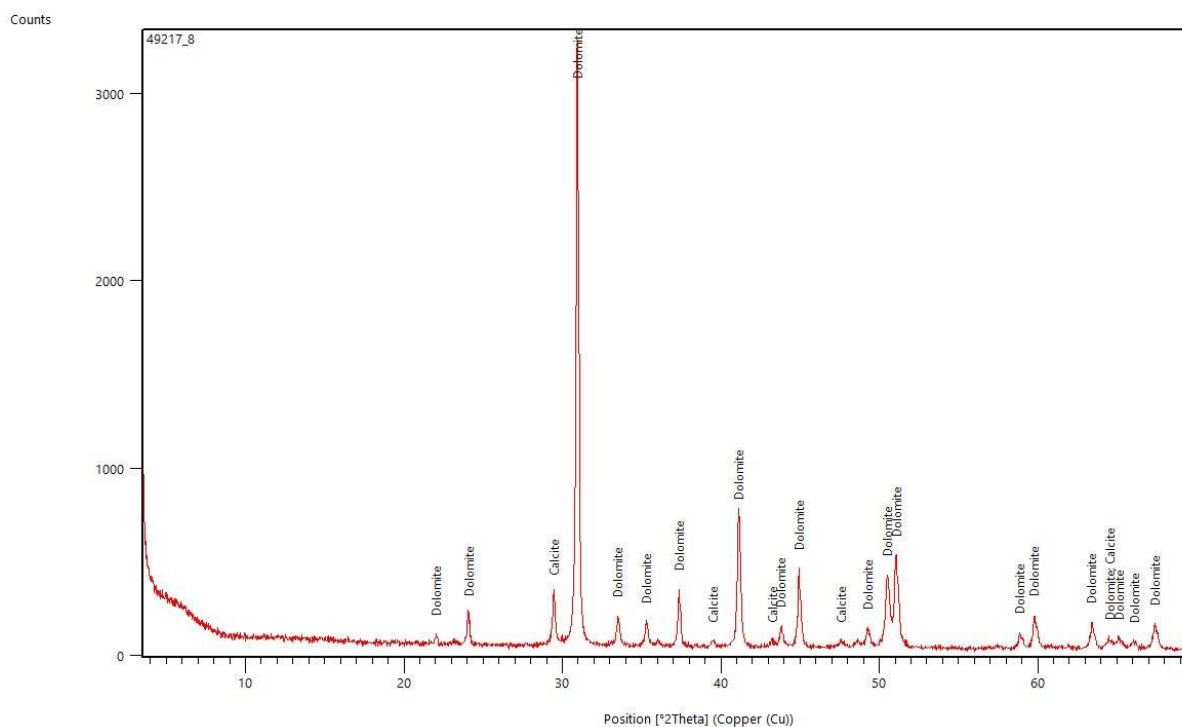


Figura 23 – Difratoograma de uma fratura de dissolução a 1m da intrusão, com forte alteração hidrotermal.

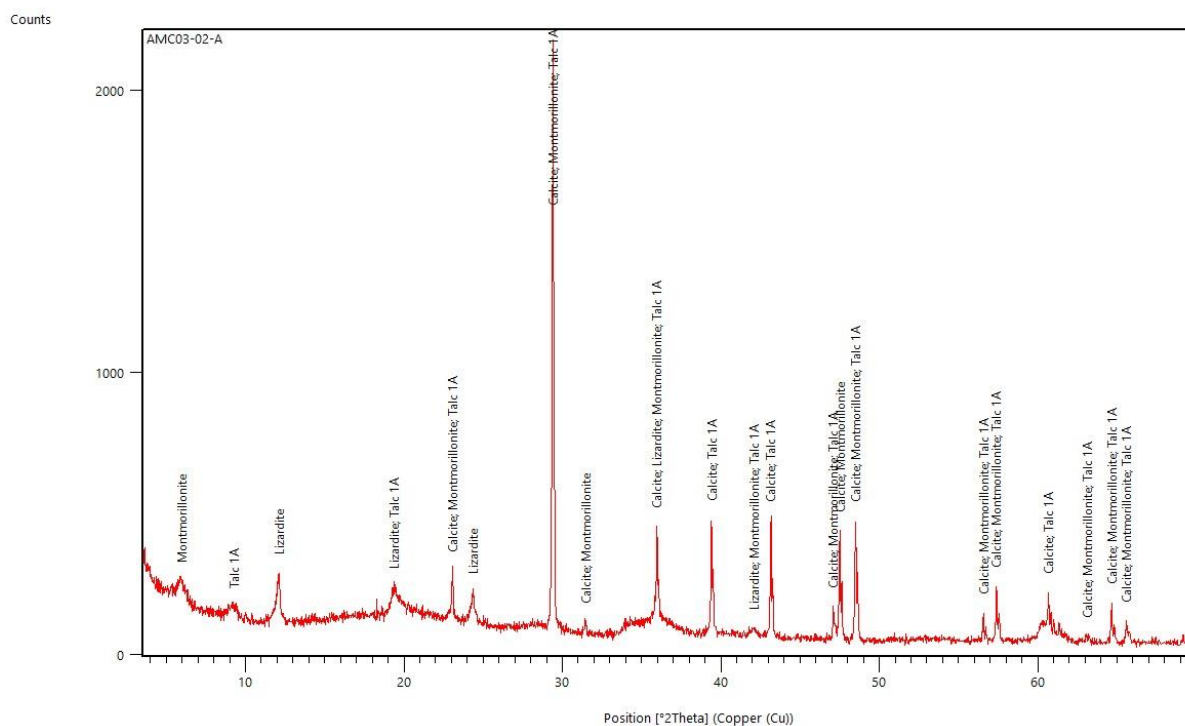


Figura 24 – Difratoograma de um carbonato a 30cm da intrusão.

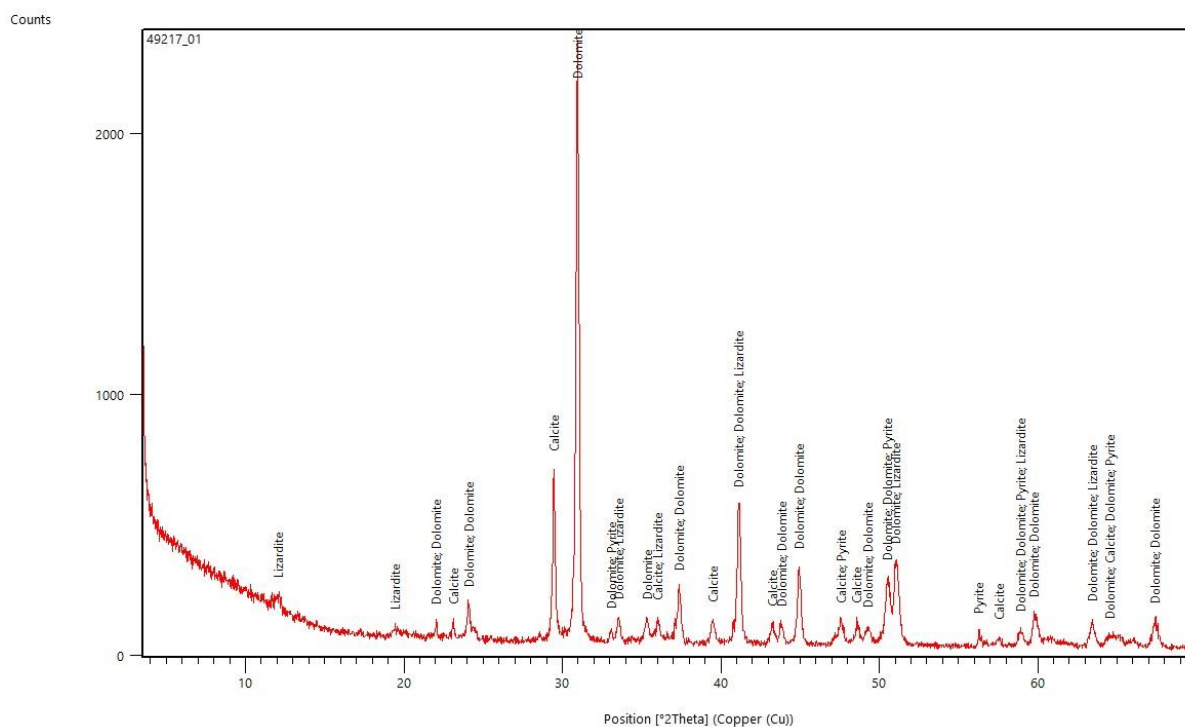
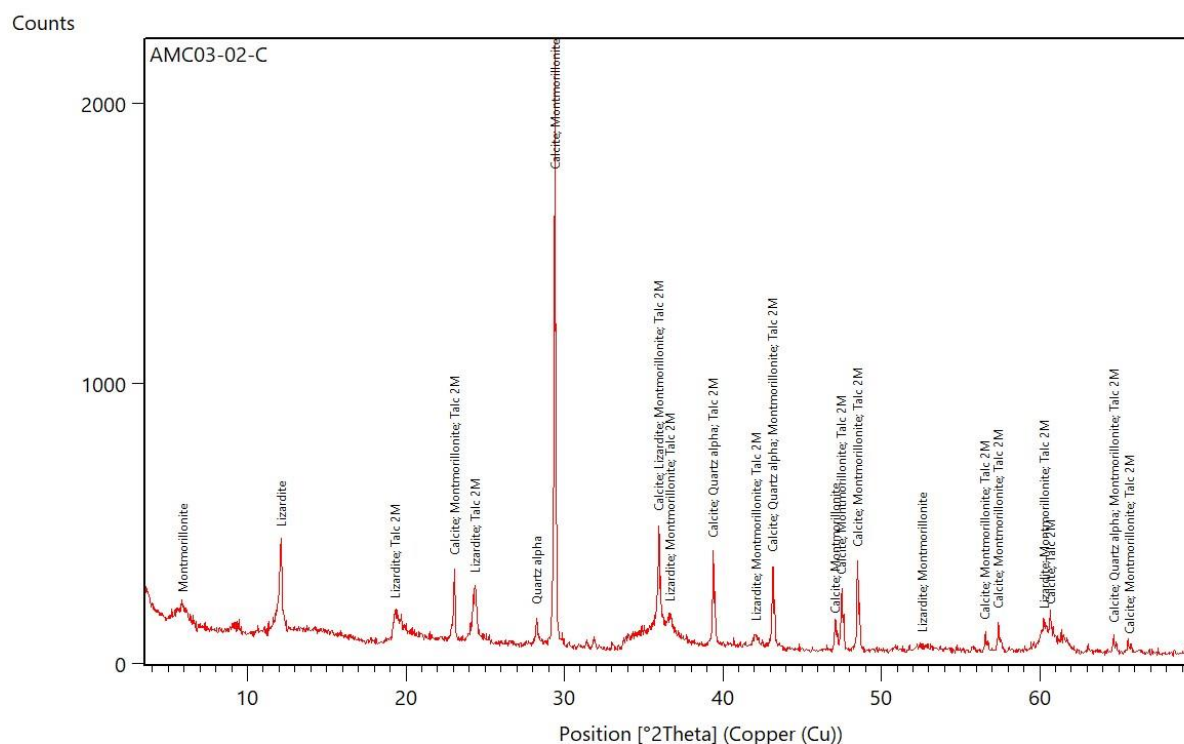




Figura 25 – Difratoograma de um nódulo diagenético a 1m da intrusão



#### 4.4.5 Terras raras

Elementos do grupo das terras raras são bons rastreadores da presença de hidrotermalismo, pois estes elementos acumulam-se nas últimas fases no processo de cristalização fracionada do magma por serem mais incompatíveis e enriquecerem os líquidos hidrotermais.

À medida que o fluxo hidrotermal avança pelos carbonatos encaixantes, o elemento európio, tende a ser capturado, sendo este um dos principais elementos do grupo das terras raras, para interpretar a distância alcançada pelas alterações hidrotermais (Tabela 12), onde a amostra 213/18-3 está mais próxima a intrusão, com um teor de 0,4 ppm, mas que decresce até a amostra 213/18-7. Pode-se perceber também pela petrologia, que a precipitação de minerais de origem hidrotermal perde em quantidade a partir dos 6m de distância da intrusão.

Tabela 8 – Amostras que foram analisadas o teor de Terra Rara nos carbonatos da Formação Irati.

| Amostra   | Distância<br>(m) | La<br>(ppm) | Ce<br>(ppm) | Pr<br>(ppm) | Nd<br>(ppm) | Sm<br>(ppm) | Eu<br>(ppm) | Gd<br>(ppm) | Tb<br>(ppm) | Dy<br>(ppm) | Ho<br>(ppm) | Er<br>(ppm) | Tm<br>(ppm) | Yb<br>(ppm) | Lu<br>(ppm) |
|-----------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 213/18-3  | 1,5              | 9,9         | 15,7        | 1,92        | 8           | 1,53        | 0,4         | 1,95        | 0,29        | 1,68        | 0,44        | 1,25        | 0,17        | 1,1         | 0,2         |
| 213/18-6  | 3                | 9           | 10,2        | 1,2         | 4,7         | 0,92        | 0,22        | 1,28        | 0,2         | 1,25        | 0,31        | 1           | 0,13        | 0,86        | 0,15        |
| 213/18-7  | 3,5              | 4,7         | 7,4         | 1           | 3,9         | 0,84        | 0,17        | 0,95        | 0,15        | 0,91        | 0,17        | 0,55        | 0,06        | 0,4         | 0,06        |
| 213/18-14 | 7                | 5,3         | 8,9         | 1,06        | 4,5         | 1,02        | 0,3         | 1,19        | 0,2         | 1,09        | 0,26        | 0,9         | 0,14        | 0,98        | 0,15        |
| 213/18-17 | 8,5              | 7,8         | 10,9        | 1,32        | 5,4         | 1,15        | 0,3         | 1,45        | 0,25        | 1,54        | 0,34        | 1,01        | 0,15        | 1,15        | 0,18        |

#### 4.5 Conclusões

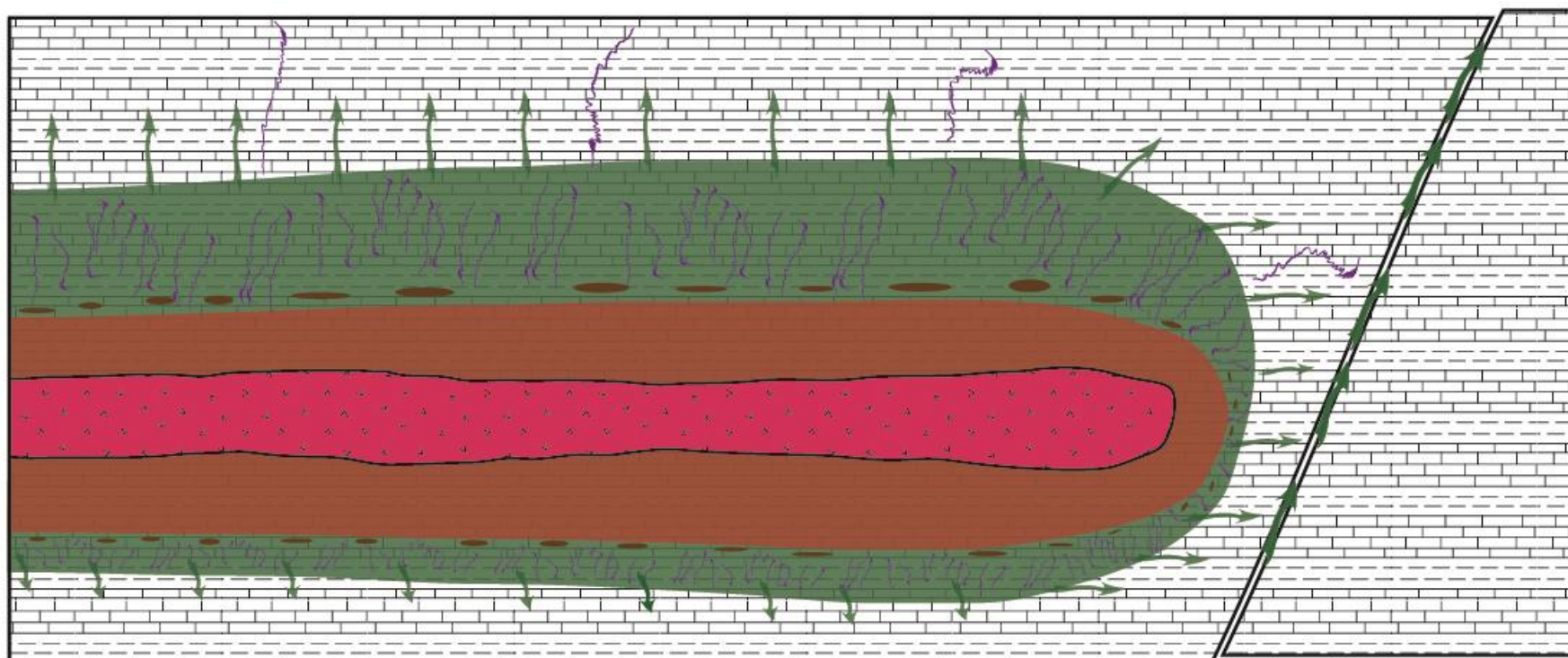
A Figura 28 é a construção de um modelo de como as alterações se distribuem na Formação Irati. O hidrotermalismo é muito mais potente nas rochas que sobrepõe a intrusão, diferente da área do halo hidrotermal abaixo da intrusão. Isto ocorre principalmente do fato que a pressão de fluidos é muito maior para cima, devido a diferença de pressão litostática. Os líquidos hidrotermais quentes, tem a tendência de ascender, desta forma o volume de carbonato alterado é consideravelmente maior pra cima do que para baixo.

As fraturas de dissolução, que tiveram sua dinâmica explicada na Figura 13, não aparecem na porção onde há maior predominância de alteração pelo halo térmico, devido ao fato de que o tempo de exposição a maiores temperaturas, oblitera qualquer feição de percolação de fluidos. Quando chega entorno dos 30cm de distância da intrusão, é quando as fraturas tem maior ocorrência, dando um aspecto de enxame (Figura 12). Contudo depois de 2m começam a ficar paulatinamente mais escassas e menos ramificadas.








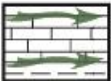

Quanto aos locais de percolação de fluidos e calor, macroscopicamente é possível perceber pela precipitação de pirita (Figura 5 e) em Rio Claro (SP) e pela capa de alteração esbranquiçada de talco (Figura 4 b), que os fluxos hidrotermais percolaram preferencialmente entre os planos de acamamento e falhas.

Utilizando o modelo da Figura 28 como preditivo para reservatórios influenciados por magmatismo, é correto interpretar que o acréscimo de permeabilidade decorrente da percolação de fluidos hidrotermais é maior nas rochas sobrepostas a intrusão.

Figura 26 – Modelo de como é a distribuição das alterações no calcário da Formação Irati pela intrusão da soleira do Grupo Serra Geral.



### Legenda

|   |                   |   |   |   |  |
|---|-------------------|---|---|---|--|
|  | Halo térmico      |  | Halo com predominância de hidrotermalismo     |  | Calcário intercalado com folhelho  |
|  | Soleira           |  | Precipitação de argilominerais                |  | Fraturas por dissolução em enxames e/ou isoladas por onde houve percolação de petróleo e gás |
|  | Fluxo hidrotermal |  | Fluxo hidrotermal preferencial entre acamadas |  | Fluxo hidrotermal preferencial por falha   |

## REFERÊNCIAS

AARNES, I., SVENSEN, H., POLTEAU, S. AND PLANKE, S. [2011]. Contact metamorphic devolatilization of shales in the Karoo Basin, South Africa, and the effects of multiple sill intrusions. *Chemical Geology*, 281(3-4), 181–194.

ALVES, D B. 1987. “Desenvolvimento Da Metodologia de Preparação de Amostras Para Análise Difratométrica de Argilominerais No Centro de Pesquisas Da Petrobrás.” *Boletim de Geociências Da PETROBRÁS* 1 (2): 157–75.

AMARAL, S. E. 1967. *Geologia e Petrologia da Formação Irati (Permiano) no estado de São Paulo*. Tese apresentada ao Concurso de Livre Docência da Cadeira de Geologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo.

ANJOS, C. W. D. 2008. *Fatores condicionantes na gênese dos argilominerais dos folhelhos negros e pelitos associados da Formação Irati no norte da Bacia do Paraná*. Tese de doutorado, UNB.

Agência Nacional de Petróleo (ANP). **Dados de Produção Diária**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/noticias/anp-e-p/4721-producao-do-pre-sal-cresce-3-3-em-julho-e-corresponde-a-55-1-do-total-do-brasil>. Acesso em: 1 abr. 2019.

Agência Nacional de Petróleo (ANP). **Formação do Pré-Sal**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/movimentacao-estocagem-e-comercializacao-de-gas-natural/transporte-de-gas-natural/acesso-a-gasodutos/2-uncategorised/4076-o-pre-sal> . Acesso em: 1 abr. 2019.

ARAÚJO L.M., TRIGÜIS J.A., CERQUEIRA J.R. & FREITAS L.C.S., 2000. The atypical Permian petroleum system of the Paraná Basin, Brazil. In: MELLO M.R. & KATZ B.J. (Eds.). *Petroleum systems of South Atlantic margins*. AAPG Memoir, n. 73, p. 377-402.

BARBOSA, O.& GOMES, F.A. 1958. *Pesquisa de Petróleo na Bacia do Rio Corumbataí, Estado de São Paulo*. Divisão de Geologia e Mineralogia do DNPM, Boletim 171, 40p.



CHAVES, H.A.F.; REZENDE, J. & PORTO ALEGRE, H. K. 1988. Geoestatística aplicada à pesquisa do xisto, Formação Irati, São Mateus do Sul, Paraná. Boletim Técnico da Petrobras, 2(2/4): 209-215.

CAORSI, J. H. & GONI, J. 1958, Geologia Vruguya: Inst. Geol. dei Vruguy, Bol. 37, Montivideo.

CORRÊA, L.M.S.A. 2007. Avaliação do efeito térmico das soleiras de diabásio nas rochas geradoras da Formação Irati (Bacia do Paraná, Brasil) através de técnicas de modelagem numérica. [Rio de Janeiro] Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis.

CUNHA P.R., SILVA O.B. & EIRAS J.F., 1988. Interpretação faciológica e ambiental do principal reservatório de hidrocarbonetos da Bacia do Solimões – área do Rio Urucu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém, Anais, v. 6, p. 2439-2454.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. 1994. O Grupo Caiuá (Ks): Revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 3, p. 164-176.

HACHIRO J., 1996. O Subgrupo Irati (Neopermiano) da Bacia do Paraná. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Jerram, D.A. 2015. Hot Rocks and Oil: Are Volcanic Margins the New Frontier?. Elsevier R&D Solutions.

KANG XU, BINGSONG YU, HANNING GONG, ZHUANG RUAN, YINGLU PAN, YAN REN. 2015. Carbonate reservoirs modified by magmatic intrusions in the Bachu área, Tarim Barin, NW China. Geoscience Frontiers 6°. P.: 779 e 790.

KULLERUD, K., 2007. Disponível em: Disponível em: [http://webgeology.alfaweb.no/webgeology\\_files/brazil/metamorph.html](http://webgeology.alfaweb.no/webgeology_files/brazil/metamorph.html) Acesso em: 1 abr. 2019.

LEINZ, V. 1937. Observações nos contatos ele diabásio com sedimentos: Serv . Geol. e Min., Notas preliminares e estudos, nº 7, pp. 13-16, Rio de Janeiro.

LIMA, B. E. M., ROS, L. F. 2019. Deposition, diagenetic and hydrothermal processes in the Aptian Pre-Salt lacustrine carbonate reservoirs of the northern Campos Basin, offshore Brazil. *Sedimentary Geology*. V. 383, p. 55-81

MAGOON L.B. & DOW W.G., 1994. The petroleum system. *AAPG Memoir*, n. 60, p. 3-24.

MENDES, J. C., FULFARO, V. J., AMARAL. S. E. e LANCLIM, P. M. B. 1966. A Formação Irati (Permiano) e fácies associadas: *Bol. Soco Bras. Geol.*, val. 15, n.o 3, pp. 55-69, São Paulo.

MILANI E.J., FRANÇA A.B. & SCHNEIDER R.L. 1994. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 1, n. 8, p. 69-82.

MILANI E. J., 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. 2 v. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre.

MILANI, E. J., MELO, J. H. G., SOUZA, P. A., FERNANDES, L. A., FRANÇA, A. B. 2007a. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências. Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov.

MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; MEDEIROS, R. A., 2007b. Rochas geradoras e rochas reservatório da Bacia do Paraná faixa oriental de afloramentos, Estado do Paraná. In: Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências Petrobras*. Petrobras, Rio de Janeiro, v.15, n.1, p. 135-162.

PENNA, R., ARAÚJO, S., GEISSLINGER, A., SANSONOWSKI. R., OLIVEIRA, L., ROSSETO, J., MATOS, M. 2019. Carbonate and igneous rock characterization through reprocessing, FWI imaging, and elastic inversion of a legacy seismic data set in Brazilian presalt province. *The Leading Edge, special section: case studies: conventionals*. V. 38, n. 1, p. 11-24.

RODRIGUES R., 1995. A geoquímica orgânica na Bacia do Parnaíba. 225p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre.

SANTOS R.V., SOUZA P.A., ALVARENGA C.J.S., DANTAS E.L., PIMENTEL M.M., OLIVEIRA C.G. & ARAÚJO L.M. 2006. Shrimp U-Pb zircon dating and palynology of bentonitic layers from the Irati Formation, Permiano of the Brazilian Paraná Basin. In: SIMPOSIO ARGENTINO DE PALEOBOTANICA Y PALINOLOGIA, 13, Buenos Aires. Resúmenes, ALPP, p.12.

Schneider, R.L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F., Nogueira, A.A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Anais, p. 41-65.

SCHOFIELD, N., HOLFORD, S., MILLETT, J., BROWN, D., JOLLEY, D., PASSEY, S., MUIRHEAD, D., GROVE, C., MAGEE, C., MURRAY, J., HOLE, M., JACKSON, C., STEVENSON, C. 2017. Regional Magma Plumbing and emplacement mechanisms of the Faroe-Shetland Sill Complex: Implications for magma transport and petroleum systems within sedimentary basins. Basin Research, p. 41-63.

SCHLUMBERGER. 2007. Carbonate Reservoirs. Technical Brochure.

SCHUTTER, S.R. 2003. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks. In: N. Petford and K.J.W. McCaffrey (Eds), Hydrocarbons in Crystalline Rocks. Geological Society, Special Publications, London, p. 35-68.

SENGER, K., MILLETT, J., PLANKE, S., OGATA, K., EIDE, C. H., FESTØY, M., GALLAND, O., JERRAM, D. A. 2017. Effects of igneous intrusions on the petroleum system: a review. First Beak I, v. 35, p. 47 – 56.

VAIL, P. R.; MITCHUM, R. M.; THOMPSON, S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap. In: PAYTON, C. E. (Ed.). Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977. p. 63-81. (AAPG. Memoir, 26).

WITTE, J., BONORA, M., CARBONE, C., ONCKEN, O. 2012. Fracture evolution in oil-producing sills of the Rio Grande Valley, northern Neuquén Basin, Argentina. AAPG Bulletin, 96(7), p. 1253-1277.

## APÊNCIDE A – ACEITE DE PUBLICAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RESUMO EM EVENTO.



Prezado (a) Autor (a) ALEXANDRE MILLEN DE CASTRO,

O Comitê Técnico-Científico do 49º Congresso Brasileiro de Geologia / 9º Simpósio do Cretáceo do Brasil / VII Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados tem o prazer de comunicar que o seu resumo intitulado “DETERMINAÇÃO DAS ALTERAÇÕES PROVOCADAS PELAS INTRUSÕES CRETÁCEAS NOS CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO IRATI”, “CÓDIGO 8921”, foi **aprovado** para inclusão nos anais e apresentação durante o Evento.

Disponível nos anais em: <http://cbg2018anais.siteoficial.ws/anexos/anais49cbg.pdf>